MICROBIOLOGIA E BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL *IN FOCO*

TEMA: SUSTENTABILIDADE

ORGANIZADORAS

CAMILA VOGT DOS SANTOS
FABIANA GISELE DA SILVA PINTO

Editora Poisson

VOLUME 2

Fabiana Gisele da Silva Pinto
Camila Vogt dos Santos
Organizadores

Microbiologia e Biotecnologia ambiental in foco

Volume 2

TEMA: SUSTENTABILIDADE

1ª Edição

Belo Horizonte

Editora Poisson

2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
Ms. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M626

Microbiologia e Biotecnologia Ambiental in foco: tema sustentabilidade - Volume 2/ Organização: Fabiana Gisele da Silva Pinto, Camila Vogt dos Santos – Belo Horizonte MG: Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-527-4
DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Microbiologia 2. Biotecnologia. I. PINTO, Fabiana Gisele da Silva II. SANTOS, Camila Vogt dos III. Título

CDD-570

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

Organizadores

Fabiana Gisele da Silva Pinto

Possui graduação (1996), mestrado (1999) e doutorado (2007) em Microbiologia pela Universidade Estadual de Londrina, com doutorado-sanduíche na Universidad de Sevilla. É professora Associada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) no curso de Ciências Biológicas e atua no Ambiente AgriTech Symbiosis Lab em parcerias PDI com o setor agroalimentar. Coordena o Laboratório Multiusuário de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI) no Campus Cascavel, prestando serviços em análises microbiológicas e moleculares de bioinsumos, bioprodutos e amostras ambientais. Orienta alunos nos Programas de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN) e Engenharia Agrícola (PGEAGRI), além de iniciação científica e trabalhos de conclusão de curso nas linhas de pesquisas: Prospecção de substâncias bioativas e processos microbianos com potencial biotecnológico e Desenvolvimento de bioinsumos, bioprodutos e nanotecnologias com aplicações agroalimentares.

Camila Vogt dos Santos

Doutoranda em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Possui mestrado em Conservação e Manejo de Recursos Naturais e graduação em Ciências Biológicas pela UNIOESTE. Atuou como Bolsista Técnica Nível II no projeto NAPI Biodiversidade: Recursos Genéticos e Biotecnologia. Atualmente, integra o Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI), em que desenvolve pesquisas em Microbiologia Agrícola, Ambiental e Clínica, Biotecnologia Microbiana e Nanopartículas Verdes.

Autores

Adilson Ricken Schuelter

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 1987-1992), mestre e doutor em Genética e Melhoramento pela Universidade Federal de Viçosa (UFV, 1993-1999) e pós-doutor pelo CNPMS/EMBRAPA (2000-2001) e pela PPEQ/UNIOESTE (2016-2018). Atualmente, é docente do curso de Agronomia no Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (UDC) e professor dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI/UNIOESTE) e Bioenergia (PPGB/UNIOESTE – Associação em Rede). Também atua como pesquisador do PPEQ/UNIOESTE e melhorista de milho na MaisGenes Sementes LTDA, em Toledo. Possui experiência como docente na Universidade Paranaense (2001-2009) e na UFPR – Setor Palotina (2018), além de atuar em pesquisa e desenvolvimento no setor privado, incluindo DuPont Pioneer Sementes (2005-2009), Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (2010-2015) e Coodetec/DAS (2015). Desde 2001, tem coorientado dissertações e teses em programas de pós-graduação da UFV, UNIOESTE e UEM. Desenvolve pesquisas nas áreas de genética, fisiologia e melhoramento de plantas.

Adriá Braun Vieira

Mestranda no programa de pós-graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) e bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ao longo de sua trajetória acadêmica, desenvolveu pesquisas em fixação biológica de nitrogênio, contaminantes emergentes, aplicação de extratos vegetais, microbiologia, alelopatia, e síntese verde de nanopartículas.

Affonso Celso Gonçalves Junior

Possui Graduação em Química Industrial (UFSM), Mestrado em Agroquímica (UEM), Doutorado em Química Analítica (USFC), Pós-Doutorado em Remediação de Compartimentos Ambientais (Universidade de Santiago de Compostela - Espanha), Pós-Doutorado em Ciências Ambientais (UFG) e Pós-Doutorado em Ciências Agrárias (UEM). É professor Associado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) no Campus de Cascavel, atuando na graduação junto aos cursos de engenharias. Lidera o Grupo de Estudos em Solos e Meio Ambiente (GESOMA), coordena o Laboratório de Química Aplicada e Ambiental (BIOMÉDICAS) e coordena o Laboratório de Química Analítica e Ambiental (BIOINFRA). Atua nos Programas de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN) e Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA). É bolsista Produtividade em Pesquisa pelo CNPq na área de Ciências Ambientais. Atua junto ao Ministério da Agricultura como consultor na área de Resíduos e Contaminantes.

Autores

Alexandre Magno de Sousa Maximiano

Engenheiro geológico (1995) com mestrado em hidrogeologia aplicada ao gerenciamento de áreas contaminadas (2011) e doutorado em transporte de vapores no solo e intrusão de vapores (USP, 2020). Especializou-se em modelos matemáticos de fluxo e transporte de contaminantes no Canadá e em avaliação de risco nos EUA. Atualmente, faz pós-doutorado na UNIOESTE, estudando Diagnóstico e Avaliação de Risco em impactos ambientais de desastres regionais. Atua há 30 anos em diagnóstico ambiental, avaliação de risco e remediação de áreas contaminadas. Diretor técnico da TECNOHIDRO®, foi consultor no manual de gerenciamento de áreas contaminadas da CETESB e desenvolveu ferramentas de quantificação de risco para a CETESB-SP. Coautor de livros sobre gerenciamento e reabilitação de áreas contaminadas, em parceria com IPT-SP e AESAS.

Alice Jacobus de Moraes

Possui graduação em Tecnologia Ambiental – Resíduos Industriais (2002), Especialização em Metodologias para o Ensino de Química (2003) e Licenciatura em Química (2018) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-MD); mestrado (2010) e doutorado (2016) em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Atuou como professora de Química em cursos de Licenciatura e Engenharia no Instituto Federal do Paraná (IFPR) (2023) e no Centro Universitário UNIVEL (2019-2023), e como professora nos cursos de engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) (2006-2017). Atualmente é Técnica no Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI).

Aline Snak

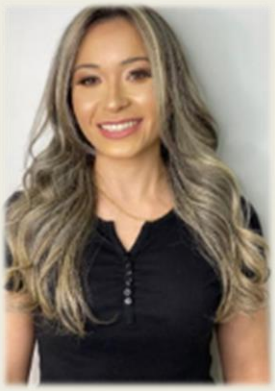
Doutora em Engenharia de Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2024), mestre em Tecnologias de Bioprodutos Agroindustriais na área de Biotecnologia e Agrotecnologia pela Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina (2018), especialista em Biotecnologia pela Universidade Estadual de Maringá (2019) e em Fitopatologia pela Faculdade Metropolitana (2021). Possui graduação em Ciências Biológicas (Bacharelado) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2016) e graduação em Agronomia pela Universidade Norte do Paraná (2024). Atualmente, é sócia-proprietária e responsável técnica pelo SBS Laboratório – Análises Agronômicas e Veterinárias, onde atua no setor agronômico e biológico. Tem experiência nas áreas de melhoramento genético vegetal, microbiologia agrícola, interação planta-bactéria, qualidade do solo, análise de solo, água e fertilizantes.

Autores

Amanda Janaina Gonsatti Feitosa

Possui graduação em Ciências Biológicas - Bacharelado (UNIOESTE) onde desenvolveu projetos de pesquisa na área da Fisiologia Vegetal com foco na alelopatia de espécies nativas em associação com cultivares agrícolas nos sistemas agroflorestais (Saf's). Atualmente mestranda no Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (UNIOESTE) na área de monitoramento de ambientes antropizados, fazendo parte do Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI) no desenvolvimento de pesquisas com extratos vegetais e biossíntese de nanopartículas metálicas para avaliação de suas atividades biológicas, com o intuito de aplicações na saúde, meio ambiente e agricultura.

Amanda Rafaela de Arruda



Graduada em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Paraná-UFPR (2022). Possui formação em Agronomia pelo Instituto Brasileiro de Tecnologia Avançada-UNIBTA. Atuou na área de Agronomia em laboratório de análise agronômica. Mestranda no Programa de pós Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN) na Universidade Estadual do Oeste do Paraná-Unioeste. Além disso, atua em pesquisa de nematologia vegetal, com foco na determinação e avaliação as espécies de nematoides *Pratylenchus* e *Meloidogyne* em cidades no oeste do Paraná.

Ana Clara Santos Costa Barreto

Cursando graduação em Ciências Biológicas Bacharel na Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Atualmente bolsista do PIBITI no Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI).

Autores

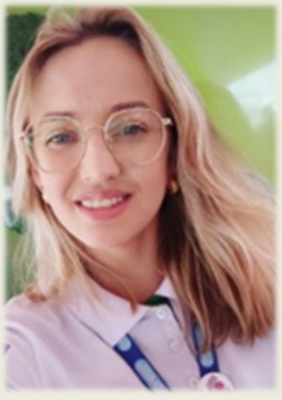
Andressa Luiza Machado dos Santos

Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE, 2021) e especialista em Microbiologia e em Metodologia do Ensino de Biologia pela UNINTER (2024). Possui experiência em laboratórios de alimentos e análises clínicas. Atualmente, cursa o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Recursos Naturais da UNIOESTE (Bolsista CAPES), integra o Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI) e desenvolve pesquisas na área de bioinsumos, com foco na aplicação de biochar para a promoção do crescimento vegetal e na mitigação do estresse abiótico.

Carina Contini Triques de Almeida

Possui graduação (2017), mestrado (2019), doutorado (2022) e pós-doutorado (2024) em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) com período graduação sanduíche na Universidade de Debrecen (Hungria). Foi técnica do laboratório AgriTech Symbiosis e atualmente é professora do curso de Engenharia Química na Unioeste. Atua com as linhas de pesquisa de tratamento de efluentes, extração de compostos bioativos a partir de plantas e tecidos animais e valorização de matérias-primas secundárias cárneas através de processos de hidrólise e extração.

Debora Marina Bandeira



Graduada em Ciências Biológicas pela UNIPAR (2018), com mestrado em Conservação e Manejo de Recursos Naturais pela UNIOESTE (2021), Especialista em Microbiologia Agrícola (2024) e doutorado em Engenharia Agrícola (2025). Realizou intercâmbio acadêmico na Kyoto Prefectural University (Japão) pelo Projeto Sakura Science (2025). Atua na área de Microbiologia Ambiental e Agrícola, Biotecnologia e nanopartículas verdes e no desenvolvimento de bioinsumos para a agricultura.

Autores

Débora Pedroso

Possui graduação em Ciências Biológicas (Bacharelado) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) (2025). Participou do programa Sakura Science Club em parceria com a Kyoto Prefectural University (2025). Atualmente, integra o Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI), atuando em projetos de bioprospecção de microrganismos com potencial biotecnológico para a produção de bioinoculantes.

Eduardo Jorge Pilau

Possui graduação em Química Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (2003), mestrado em Química pela Universidade Federal de Santa Maria (2005), Doutorado em Química pela Universidade Estadual de Campinas (2010), Pós-doutorado em Química pela Universidade Estadual de Campinas (2010) e Pós-doutorado em Química pela University of Western Ontario, London, Canadá (2012). Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Química da Universidade Estadual de Maringá. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Espectrometria de Massas, atuando principalmente nos seguintes temas: espectrometria de massas, proteômica e metabolômica.

Eli Marchesa

Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Paranaense (2007). Especialização em Análise Ambiental pela Universidade Paranaense (2009). Mestrado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em Pato Branco na linha de Produção Vegetal, (2011). Doutorado pelo programa de Pós-graduação em Agronomia UTFPR (2012-2016). Estágio Sanduíche realizado na Mississippi State University(EUA), no departamento de Weed Science (2014-2015). Atualmente professora da Universidade Paranaense (UNIPAR).

Autores

Gabrielle Caroline Peiter

Graduada em Ciências Biológicas pela UNIPAR (2015) e licenciada em Química pela UTFPR (2019), é mestre em Tecnologia de Bioprodutos Agroindustriais (2017) e doutora em Bioquímica e Biologia Molecular (2023) pela UFPR. É professora da UFPR – Campus Toledo, atuando nas áreas de Genética, Histologia e Biologia Celular. Desenvolve projetos voltados à avaliação da atividade antimicrobiana e anti-inflamatória de compostos bioativos e biomateriais funcionais, com ênfase em produtos naturais. Atua em experimentação in vitro e in vivo, cultura de células, qPCR, bioensaios com fungos e bactérias, além da caracterização estrutural e funcional dos materiais testados. Finalista do prêmio 25 Mulheres na Ciência (3M/2024), é fundadora da página de divulgação científica @labmates, voltada à popularização da ciência nas redes sociais.

Jéssica Rosset

Possuí graduação em Ciências Biológicas Licenciatura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Atualmente mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Desenvolve pesquisas sobre síntese verde e aplicação de nanopartículas na agricultura.

Joacir João Neto Piana

Engenheiro Químico (2024) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), atualmente bolsista de mestrado pelo programa MAI/DAI. Atua nas áreas de extração de compostos bioativos de plantas por métodos não convencionais, obtenção de materiais bioativos e dermocosméticos utilizando extratos vegetais. Além disso, trabalha na valorização de matérias-primas secundárias e residuais da agroindústria por meio de processos enzimáticos para a criação de novos produtos.

Autores

Keiti Lopes Maestre

Tecnóloga em Processos Químicos (2014) e Química (2015) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Possui mestrado (2017), doutorado (2020) e pós-doutorado (2021, 2023 e 2024) em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Atualmente, é professora de Química na UNIOESTE e desenvolve pesquisas nas áreas de processos fermentativos e enzimáticos, extração de compostos bioativos de plantas e desenvolvimento de biomateriais.

Larissa Echeverria

Possui graduação em Engenharia de Alimentos (2018) e Mestrado em Sustentabilidade (2021), ambos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Atualmente é Profissional Doutora de um Projeto do Programa AGEUNI. Atua na linha de pesquisa de reaproveitamento de matérias-primas secundárias agroindustriais e sua incorporação para a produção de alimentos funcionais e hidrólise enzimática para obtenção de compostos bioativos para a produção de produtos de alto valor agregado.

Luana de Souza

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Graduada em Ciências Biológicas – Licenciatura (2022) pela mesma instituição. Durante a graduação, foi bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) por dois anos, desenvolvendo pesquisas na área de Fisiologia Vegetal, com enfoque em alelopatia de plantas. Atualmente, integra o Laboratório Multiusuário de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI), onde conduz pesquisas nas áreas de Microbiologia Agrícola e Ambiental e Biotecnologia Microbiana.

Autores

Marcela Jacomini Corsini

Possui Graduação em Geologia (USP), aluna do Programa de Conservação e Manejo de Recursos Naturais (UNIOESTE), MBA em gerenciamento de projetos pela BBS *School*. Atua na área de meio ambiente desde janeiro de 2007, na empresa Grupo EPA. Experiencia em avaliação de riscos à saúde humana e ecológicos, através do software RBCA, Planilhas de Avaliação de Riscos da Cetesb, RISC 5, SADA, ECOSAR, entre outros. Gerente dos Estudos de Avaliação de Riscos à Saúde Humana e Ecológico em desenvolvimento na Bacia do Paraopeba, região afetada pelo rompimento da Barragem de Brumadinho (2019) e dos Estudos de Avaliação de Riscos à Saúde Humana e Ecológico nas áreas afetadas pelo rompimento das Barragens de Fundão em Mariana - MG (2015). Experiencia na área de avaliação ambiental forense para identificação de uma fonte de contaminantes, o momento da liberação e sua distribuição no subsolo, através de modelos de degradação química, modelagem de transporte de contaminantes, análises de isótopos estáveis, padrões de intemperismo e biomarcadores.

Mayara Gomes Tomassoni

Possui graduação em Ciências Biológicas (Bacharelado) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) (2025). Integrante do Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI), com foco em pesquisas voltadas à prospecção de microrganismos com potencial biotecnológico, visando ao desenvolvimento de bioinsumos para aplicação em sistemas agrícolas sustentáveis.

Mayara Maria de Souza

Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) (2024). Atua como bolsista técnica nível I no projeto Napi Taxonline fazendo manutenção da Coleção de Cultura dos Microrganismos Multifuncionais e de Importancia Ambiental e Biotecnológica do Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia – CCMMIAB - (LAMIBI).

Autores

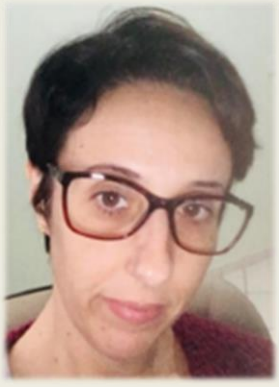
Mônica Lady Fiorese

Graduada em Engenharia Química (FURB; 2001), com mestrado em Engenharia de Alimentos (UFSC; 2004) e doutorado em Engenharia Química (2008) pela Universidade Estadual de Santa Catarina, com doutorado-sanduíche na Universidade Nova de Lisboa. É professora Associada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) no curso de Engenharia Química e é a idealizadora e coordenadora do Ambiente AgriTech Symbiosis exercendo diversas parcerias PDI com o setor agroalimentar. Coordena o Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LES) no Campus Toledo, prestando serviços principalmente na área de valorização de matérias-primas secundárias agroindustriais. Atua nas linhas de pesquisas: Processos fermentativos, enzimáticos e de extração para agregação de valor comercial de subprodutos/coprodutos industriais provenientes do processamento de alimentos, além de pesquisa na área Plantas – PANCs (plantas alimentícias não convencionais) para a produção de ativos antioxidantes e antimicrobianos.

Odair Alberton

Graduado em Agronomia pela UDESC (2001), com mestrado em Microbiologia pela UEL (2003) e doutorado em 'Production Ecology and Resource Conservation' pela Wageningen University, Holanda (2008), reconhecido em Agronomia pela UEL (2009). Professor da UNIPAR, leciona Microbiologia Agrícola (desde 2011) e Microbiologia Ambiental (desde 2019). Coordena e orienta no Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura (desde 2010) e no Mestrado Profissional em Plantas Medicinais e Fitoterápicos (desde 2018). Desenvolve pesquisas em Microbiologia e Bioquímica do Solo, com foco em manejo, bioindicadores, micorrizas e interação planta-micro-organismo. Atua como consultor ad hoc para a Fundação Araucária-PR, FACEPE, CAPES e CNPq.

Patrícia da Costa Zonetti



Professora Associada do Departamento de Ciências Agronômicas da Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina. Ministra aulas na disciplina de Fisiologia Vegetal dos Cursos de: Agronomia, Ciências Biológicas e Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. Também é docente do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia - nível de mestrado. Orienta trabalhos na área de Alelopatia e com o uso de reguladores de crescimento no desenvolvimento de plantas. Líder do Grupo de Pesquisa do CNPq: Produção e Aplicações de Plantas Medicinais e Fitoterápicos.

Autores

Paula Derksen Macruz

Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2015), Bacharel em Química Industrial pela Fundação Educacional do Município de Assis (2018) e mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2021). Tem experiência em laboratório de controle de qualidade (Raízen Tarumã) e experiência na área de Engenharia Sanitária, com ênfase em química ambiental, práticas laboratoriais e tratamento oxidativos avançados. Atuou como bolsista técnica no laboratório de absorção atômica e no laboratório de cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massa do Complexo de Apoio a Pesquisa Científica (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá. Atualmente é doutoranda no programa de pós-graduação em química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM) com foco em metabolômica e bioinformática.

Paulo Roberto da Silva

Graduado em Ciências Biológicas pela UEM (2000), com mestrado (2002) e doutorado (2006) em Biologia Celular e Molecular pela UFRGS, incluindo período sanduíche na Pioneer Hi-Bred International, EUA. Professor doutor na UNICENTRO desde 2007, atua em Genética Molecular, com foco em biotecnologia, conservação de plantas e fungos nativos e melhoramento genético vegetal. Pesquisa genética de populações, diversidade genética, resistência a doenças, marcadores moleculares e bioprospecção de microrganismos. Orienta no PPG em Biologia Evolutiva e já integrou programas de Agronomia e Ensino de Ciências. Atualmente, é Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação da UNICENTRO, membro do Núcleo Docente Estruturante do Departamento de Ciências Biológicas e bolsista de produtividade do CNPq (PQ2).

Regina Neves Ubial Costa

Doutoranda em Engenharia de Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) com o a pesquisa de Desenvolvimento de Adjuvantes Agrícolas Naturais. Graduada em Ciências Biológicas Licenciatura pelo Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz (2017); Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura pela UNIOESTE (2022- 2024) - Área de Concentração: Agroenergia, Linha de Pesquisa: Biomassa e Culturas Energéticas. Com o projeto de Mestrado orientada pelo professor Dr. Reginaldo Ferreira Santos, cujo tema "Avaliação de diferentes adjuvantes agrícolas: análise das características físicos-químicas e efeito de dessecante aplicado na cultura de soja.

Autores

Reginaldo Ferreira Santos

Graduado em Agronomia (1994) e mestre em Engenharia Agrícola (1997) pela UFSM, com doutorado (2001) e pós-doutorados (2016) na Unesp e Unicamp em manejo de irrigação. Docente da UNIOESTE desde 1998, onde é responsável pelo Laboratório de Biocombustíveis e pela Estação Meteorológica (desde 2010) e pelo Laboratório Multiusuário em Tecnologias Sustentáveis (desde 2022). Foi Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa da UNIOESTE (2019) e Diretor do Núcleo de Inovações Tecnológicas (2017-2019, 2020-2022). Atualmente, é vice-coordenador do Comitê Assessor de Inovação da Fundação Araucária (2020-2024), coordenador institucional do programa Top Manager (2024-2028) e bolsista produtividade CNPq 1D. Também foi coordenador do curso de Agronomia no Centro Universitário Assis Gurgacz (2004-2012) e é titular da cadeira 82 da Academia Brasileira de Ciências Agronômicas (2024).

Renata Mussoi Giacomin

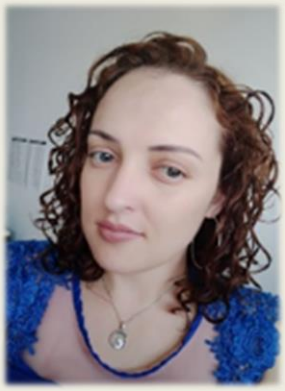
Graduada em Ciências Biológicas - Licenciatura (2012) pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), na qual também concluiu o Mestrado Acadêmico (2012-2014), com período de intercâmbio sanduíche na University of Saskatchewan, Canadá (2013). Doutora em Genética e Biologia Molecular, pela Universidade Estadual de Londrina (2019). É Professora no Ensino Superior, ministrando disciplinas nas áreas de Genética, Biologia Celular e Molecular, e Bioinformática. Integra o Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Biologia Evolutiva, onde orienta alunos de mestrado e ministra disciplinas para mestrado e doutorado. Participa das redes de pesquisa do Paraná, NAPI Biodiversidade e NAPI Bioinformática, desenvolvendo pesquisas nas áreas de Sistemática Filogenética, Diversidade genética e Genética de Populações, Biotecnologia aplicada à Conservação de Espécies Nativas, e Melhoramento Genético de Plantas, Interação Planta-Microrganismos, Expressão Gênica e Bioprospecção de Fungos nativos para o desenvolvimento de bioprodutos.

Roberto Luis Portz

Possui graduação (2000) e mestrado (2003) em Agronomia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), e doutorado em Ciências Naturais pela Technische Universität München - Alemanha (2009). É professor Associado de Fitopatologia do curso de Agronomia da Universidade Federal do Paraná (UFPR - Setor Palotina), além de docente permanente do Programa de Pós-graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) Campus de Cascavel. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Fitopatologia, atuando principalmente nos seguintes temas: microbiologia e nematologia vegetal, bactérias fitopatogênicas, patologia florestal, botânica e fisiologia vegetal, fisiologia e bioquímica fitopatológica, biologia molecular.

Autores

Silvana Damin



Possui doutorado em Biologia Comparada pela Universidade Estadual de Maringá (2020), mestrado em Conservação e Manejo de Recursos Naturais pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2013), Licenciatura em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário Assis Gurgacz (2012) e Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Paranaense (2010). Integra o quadro de especialistas em Biotecnologia pelo Conselho Regional de Biologia 7 Região (2014). Atuou como docente no Instituto Federal do Paraná (2022-2023), na Universidade Federal da Fronteira Sul (2018-2020) (2023-2024), na Universidade Paranaense (2015-2018) e no Centro Universitário de Cascavel (2013-2015). Atualmente é Sócia/Proprietária e integra o quadro técnico da Mel Bioreal, atuando sobre a produção de derivados da colmeia. Também é instrutora do curso Artesanatos de Produtos Apícolas do Senar. Desenvolve pesquisas relacionadas a biotecnologia e bioprospecção de microrganismos e derivados das abelhas, controle microbiano de insetos, com enfoque em fungos entomopatogênicos, defensivos agrícolas naturais e interação planta/micorriza

Victor Manuel Lustoza Rotta

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Paraná (UFPR – Setor Palotina), onde atuou como bolsista PIBIC no laboratório de Química Analítica e Análises Ambientais, além de bolsista extensionista no Herbário FFOP. Atualmente é mestrando em Conservação e Manejo de Recursos Naturais pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), onde desenvolve pesquisa nas áreas de botânica aplicada e controle alternativo de plantas daninhas em agroecossistemas.

Agradecimentos

A publicação deste livro só foi possível graças ao apoio de diversas instituições e pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para seu desenvolvimento. Agradeçemos à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e ao Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI) pelo suporte acadêmico e científico. Aos programas de pós-graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN) e Engenharia Agrícola (PGEAGRI), por proporcionarem a base necessária para o desenvolvimento deste estudo. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de pesquisas, à Fundação Araucária, por meio do NAPI Biodiversidade: Recursos Genéticos e Biotecnologia e NAPI Taxonline, pelo financiamento e concessão das bolsas de pesquisa. Agradeçemos também à Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (SETI) pelo auxílio no financiamento da infraestrutura e equipamentos essenciais para a realização destes trabalhos. Nosso reconhecimento também se estende à Agência de Inovação da UNIOESTE (INOVA) e à Fundação de Apoio ao Ensino, Extensão, Pesquisa e Pós-graduação (FUNDEP) pela importante parceria na gestão de contratos, convênios e projetos de pesquisa.

Sinopse

Este livro reúne pesquisas na área de Ciências Ambientais, Agrárias ou Saúde, desenvolvidas por alunos da graduação em Ciências Biológicas, Engenharia Química e dos Programas de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN) e Engenharia Agrícola (PGEAGRI) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) – Campus Cascavel. Os capítulos apresentados foram conduzidos por estudantes de Iniciação Científica (IC), mestrado e doutorado, que atuam no Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI), explorando temas voltados à sustentabilidade e inovação biotecnológica. Além disso, alguns capítulos foram elaborados por alunos como parte das atividades desenvolvidas durante disciplinas da pós-graduação, reforçando o compromisso com a formação acadêmica e a produção científica de qualidade.

O Capítulo 1 apresenta os fundamentos da nanotecnologia, desde sua definição até suas aplicações inovadoras na agricultura, medicina e indústria alimentícia. O Capítulo 2 foca no potencial biotecnológico da *Pereskia aculeata* (ora-pro-nóbis), destacando seus compostos bioativos e aplicações sustentáveis. O capítulo 3 aborda o potencial da ora-pro-nóbis na produção de dermocosméticos, destacando suas bioatividades e seu uso na medicina regenerativa. Apresenta a extração assistida por ultrassom (EAU) como método sustentável para obter compostos bioativos, além do desenvolvimento e avaliação de hidrogéis enriquecidos com os extratos obtidos. Já o Capítulo 4 aborda os potenciais biotecnológicos de plantas nativas brasileiras, com ênfase na *Myrcia glomerata*, explorando suas propriedades medicinais e a aplicação da nanotecnologia verde. O capítulo 5 aborda a importância do feijão comum na agricultura brasileira e destaca o potencial das rizobactérias nativas como alternativa sustentável ao uso de fertilizantes nitrogenados, promovendo a produção ecológica e eficiente da cultura. O Capítulo 6 aborda as propriedades do biochar de açaí, sua produção e aplicações na agricultura sustentável e na remediação ambiental, destacando seu papel na melhoria do solo. O capítulo 7 analisa o uso de resíduos agrícolas no cultivo do fungo *Pleurotus ostreatus*, destacando substratos como feno, folha de bananeira e serragem para otimizar a produção de cogumelos, promovendo uma alternativa sustentável e econômica. O Capítulo 8 explora a valorização de resíduos da piscicultura por meio da hidrólise enzimática, destacando o potencial dos hidrolisados de pescado como fontes sustentáveis de nitrogênio para meios de cultura microbiano e sua viabilidade econômica. Já os capítulos finais, de 9 a 12, foram desenvolvidos por alunos durante a disciplina de pós-graduação de Métodos de Análise Ambiental, e abordam temas essenciais para a sustentabilidade agrícola e ambiental. O Capítulo 9 discute o uso de insumos biológicos na agricultura sustentável, considerando fatores ambientais e o papel dos adjuvantes na otimização de sua aplicação. O Capítulo 10 analisa o impacto do uso intensivo de herbicidas e propõe alternativas sustentáveis, como produtos alelopáticos e manejo ecológico. No Capítulo 11, explora-se o uso de bionematicidas, com destaque para microrganismos como *Trichoderma spp.* e *Bacillus spp.*, enfatizando sua eficácia no controle de fitonematoides. O Capítulo 12 aborda os impactos ambientais do rompimento das barragens em Brumadinho, apresentando metodologias de Avaliação de Risco à Saúde Humana e estratégias de fitorremediação e biorremediação para a recuperação da bacia do Rio Paraopeba - MG.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Do surgimento à aplicação: um panorama geral sobre nanopartículas ... 21

Jéssica Rosset, Ana Clara Santos Costa Barreto, Camila Vogt dos Santos, Paula Derksen Macruz, Eduardo Jorge Pilau, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.01

Capítulo 2: Ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller): compostos bioativos, métodos de extração, interações alelopáticas e aplicações em nanotecnologia e antimicrobiana 30

Adriá Braun Vieira, Mayara Maria de Souza, Carina Contini Triques de Almeida, Mônica Lady Fiorese, Patricia da Costa Zonetti, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.02

Capítulo 3: Dermocosmético com extrato de ora-pro-nóbis para aplicações em medicina regenerativa 44

Joacir João Neto Piana, Mônica Lady Fiorese, Keiti Lopes Maestre, Carina Contini Triques de Almeida, Larissa Echeverria, Gabrielle Caroline Peiter

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.03

Capítulo 4: Potencial biotecnológico de árvores nativas *Myrcia glomerata*: compostos bioativos, extratos vegetais e nanotecnologia verde..... 63

Amanda Janaina Gonsatti Feitosa, Luana de Souza, Jéssica Rosset, Mayara Maria de Souza, Carina Contini Triques de Almeida, Mônica Lady Fiorese, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.04

Capítulo 5: Importância da bioprospecção de rizobactérias nativas para promoção de crescimento na cultura do feijoeiro..... 76

Luana de Souza, Débora Pedroso, Amanda Janaina Gonsatti Feitosa, Debora Marina Bandeira, Odair Alberton, Renata Mussoi Giacomin, Paulo Roberto da Silva, Aline Snak, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.05

Capítulo 6: Biochar: aplicações na remediação ambiental e no sequestro de carbono 92

Andressa Luiza Machado dos Santos, Mayara Gomes Tomassoni, Alice Jacobus de Moraes, Camila Vogt dos Santos, Adilson Ricken Schuelter, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.06

Capítulo 7: Cultivo sustentável de cogumelos: avaliação de substratos agrícolas para *Pleurotus ostreatus*..... 105

Mayara Gomes Tomassoni, Debora Marina Bandeira, Andressa Luiza Machado dos Santos, Silvana Damin, Eli Marchesan, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Do resíduo ao recurso: microbiologia aplicada à valorização de subprodutos do pescado..... 113

Camila Vogt dos Santos, Andressa Luiza Machado dos Santos, Mayara Maria de Souza, Mayara Gomes Tomassoni, Carina Contini Triques de Almeida, Mônica Lady Fiorese, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.08

Capítulo 9: Integração de insumos biológicos e adjuvantes na agricultura..... 123

Regina Neves Ubial Costa, Reginaldo Ferreira Santos, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.09

Capítulo 10: Perspectivas do uso de produtos naturais e da manipulação da disponibilidade de recursos do solo no controle de plantas daninhas em agroecossistemas..... 135

Victor Manuel Lustoza Rotta, Roberto Luis Portz, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.10

Capítulo 11: Desenvolvendo soluções sustentáveis: o uso de microrganismos no controle de fitonematoides..... 152

Amanda Rafaela de Arruda, Roberto Luis Portz, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.11

Capítulo 12: Estratégias de fitorremediação e biorremediação: implicações na saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental..... 169

Marcela Jacomini Corsini, Alexandre Magno de Souza Maximiano, Affonso Celso Gonçalves Junior, Fabiana Gisele da Silva Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4.CAP.12

Capítulo 1

Do surgimento à aplicação: um panorama geral sobre nanopartículas

Jéssica Rosset[1]
Ana Clara Santos Costa Barreto[2]
Camila Vogt dos Santos[3]
Paula Derksen Macruz[4]
Eduardo Jorge Pilau[5]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[6]

Resumo: A nanotecnologia tem desempenhado um papel fundamental na transformação de diversas áreas do conhecimento, viabilizando o desenvolvimento de materiais em escala nanométrica e proporcionando novas possibilidades de aplicação. Este capítulo explora alguns pontos importantes para o estudo de nanomateriais, abordando questões referentes a sua definição, a classificação de nanopartículas com base na composição, e técnicas de caracterização. Além disso, são apresentados métodos de síntese dentro das abordagens *top-down* e *bottom-up*, bem como seus principais aspectos positivos e negativos, destacando métodos de síntese biológica como uma alternativa promissora em comparação aos métodos convencionais. Por fim, são abordadas aplicações das nanopartículas na área agrícola, medicinal e na indústria alimentícia, enfatizando seu potencial inovador e reforçando a necessidade de cuidados quando se trabalha com materiais de escala nanométrica.

Palavras-chave: Nanociência. Nanomaterial. Métodos de síntese.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-8348-0649
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0003-5735-802X
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0001-7566-8003
[4] Laboratório de Biomoléculas e Espectrometria de Massa/ Departamento de Química Universidade Estadual de Maringá (UEM)/ Maringá – PR https://orcid.org/0000-0002-5474-7017
[5] Laboratório de Biomoléculas e Espectrometria de Massa/ Departamento de Química Universidade Estadual de Maringá (UEM)/ Maringá – PR https://orcid.org/0000-0002-9175-3520
[6] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é um campo científico e tecnológico que viabilizou o desenvolvimento de materiais em escala nanométrica, correspondente a 1,0 X 10^{-9} m, ou seja, um bilionésimo (0,000000001) do metro (Barragán-Ocaña; Olvera-Treviño; Silva-Borjas, 2023). Embora amplamente difundida atualmente, a nanotecnologia está presente na humanidade há milhares de anos (Rodrigues *et al*., 2021). Um exemplo notório é o "Cálice" de Licurgo, artefato do século IV d.C., cujo efeito dicroico de nanopartículas de prata e ouro presentes no vidro, faz com que ele pareça verde quando a fonte de luz branca e o observador estão do mesmo lado (reflexão), e vermelho quando estão em lados opostos (transmissão) transmissão da luz branca (Kool *et al*., 2020).

O conceito de nanotecnologia foi introduzido em 1959 na palestra *There's Plenty of Room at the Bottom*, na qual o físico americano Richard Phillips Fenyman destacou a possibilidade de manipulação de materiais e dispositivos ao nível atômico e molecular (Chaerun; Prabowo; Winarko, 2022). Em 1974, o termo *nanotecnologia* foi cunhado no artigo *On the Basic Concept of Nanotechnology*, do físico japonês Norio Taniguchi, segundo ele, "a nanotecnologia consiste principalmente no processamento de separação, consolidação e deformação de materiais por um átomo ou uma molécula" (Bayda *et al*., 2020).

O interesse pela nanociência e pela nanotecnologia cresceu ao longo do tempo, mas os avanços intensificaram-se a partir da década de 80, com a invenção dos microscópios de Tunelamento por Varredura (*Scanning Tunneling Microscope* - STM) e de Força Atômica (*Atomic Force Microscope* - AFM), a primeira manipulação de átomos e o desenvolvimento de nanotubos de carbono (Ko *et al*., 2019; Ikumapayi *et al*., 2021; Elzein, 2024). Atualmente, os nanomateriais têm aplicação em diversos segmentos industriais, apresentando propriedades físico-químicas aprimoradas em comparação com materiais de escala macrométrica (Chausali; Saxena; Prasad, 2022).

Segundo a *International Organization for Standardization* (2023), um nanomaterial é um material que possui pelo menos uma de suas dimensões externas (0D, 1D, 2D ou 3D), estrutura interna ou de superfície na nanoescala, ou seja, no intervalo de comprimento de aproximadamente 1 a 100 nm. Estes materiais podem ser classificados em nano-objetos (como nanoplacas, nanofibras e nanopartículas) e materiais nanoestruturados (pó nanoestruturado, nanocompósito, nanodispersão), entretanto, isso não significa que nano-objetos não possam ser nanoestruturados (ISO 80004-1:2023).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. NANOPARTÍCULAS

Nanopartículas são nano-objetos cujo as três dimensões externas estão na nanoescala, sendo esse termo utilizado preferencialmente quando as dimensões não diferem significativamente, normalmente em mais de três vezes (ISO 80004-1:2023). A classificação comumente encontrada para estas partículas é feita com base no tipo de material do qual ela é composta, que possibilita dividi-las em nanopartículas orgânicas, inorgânicas e à base de carbono (Wani *et al*., 2022).

Nanopartículas orgânicas são formadas a partir de compostos orgânicos, como carboidratos, lipídios, proteínas e polímeros, sendo geralmente compostas de interações moleculares não covalentes, e utilizadas na administração direcionada de medicamentos

(Joudeh; Linke, 2022; Eker *et al*., 2024). Nanopartículas inorgânicas, por sua vez, não possuem átomos de carbono em sua composição, são constituídas por ligações covalentes ou metálicas, e incluem nanopartículas metálicas, de óxidos metálicos, magnéticas, cerâmicas e semicondutoras (Dhaka *et al*., 2023; Eker *et al*., 2024). Já o último grupo, formado por nanopartículas compostas de átomos de carbono, possuí ligações de carbono hibridizadas sp ^{2}, e tem como exemplos fulerenos, materiais amorfos de formato esférico denominados carbono preto, e pontos quânticos de carbono (Zahoor *et al*., 2021; Joudeh; Linke, 2022).

A caracterização dessas partículas é essencial para analisar o tamanho, a dispersividade, carga, a morfologia e outras propriedades físico-químicas que influenciam sua interação com interfaces biológicas, ambientais e tecnológicas, contribuindo assim para a realização de *estudos in vitro* e *in vivo* que visam otimizar e direcionar sua aplicação em diversas áreas (Selmani; Kovačević; Bohinc, 2022). Atualmente, existem inúmeras técnicas que possibilitam analisar propriedades morfológicas e topográficas, estruturais e químicas, mecânicas, ópticas, eletrônicas e elétricas, magnéticas e térmicas (Joudeh; Linke, 2022).

A caracterização morfológica e topográfica, por exemplo, envolve técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM), de Tunelamento de Varredura (STM) e Eletrônica de Transmissão (TEM), e Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS). Já características estruturais e químicas são obtidas por Análise de Difração de Raios X (XRD), Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios X (XPS) e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Para aspectos mecânicos, utiliza-se Tensometria (UTM), Teste de Indentação Instrumentado e Análise Mecânica Dinâmica (DMA). Para características ópticas, eletrônicas, elétricas, existe a Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis), Espectroscopia de Refletância Difusa UV-Vis (DRS) e Elipsometria Espectroscópica. Técnicas como Microscopia de Força Magnética (MFM) e Magnetometria do Dispositivo de Interferência Quântica Supercondutor (SQUID) possibilitam análises magnéticas, já a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e o Método de Fio Quente Transiente possibilitam análises térmicas (Joudeh; Linke, 2022).

2.2. MÉTODOS DE SÍNTESE

Partículas nanométricas possuem propriedades físico-químicas únicas, em que características como o tamanho e a elevada razão superfície volume, proporcionam maior reatividade, e consequentemente, mais vantagens e desafios em relação a outros tipos de materiais (Maťátková *et al*., 2022). As nanopartículas podem ser produzidas por meio da abordagem *top-down*, em que partículas nanométricas são originadas a partir da quebra de material a granel, ou por meio da abordagem *bottom-up*, em que as partículas são construídas a partir de átomos ou moléculas (Kumari *et al*., 2023). Na primeira abordagem geralmente enquadram-se métodos físicos, e na segunda, métodos químicos e biológicos, cada qual associados a vantagens e desvantagens (Ndaba *et al*., 2022; Jamuna *et al*., 2023).

Os métodos químicos são os mais utilizados, pois além do baixo custo, possibilitam controle mais preciso do tamanho e da forma das partículas (Khan *et al*., 2022). No entanto, muitos desses processos geram subprodutos tóxicos, e envolvem o uso de solventes orgânicos e agentes redutores nocivos para o ambiente e para a saúde humana, como o etilenoglicol, o borohidreto e o citrato de sódio, a oleil amina, e a parafina líquida (Vishwanath; Negi, 2021). Alguns métodos químicos incluem Síntese Assistida por Micro-

ondas, Síntese Hidrotérmica, Síntese de Poliol, Técnica de Microemulsão, Método Sol-gel e Vapores Químicos (Kumari *et al*., 2023).

Em contraste aos métodos químicos, os métodos físicos destacam-se por possibilitarem síntese mais rápida e em maior quantidade, entretanto, eles implicam em defeitos na estrutura de superfície das partículas (Zulfiqar *et al*., 2019; Lee *et al*., 2020; Kumari *et al*., 2023). Estes métodos tendem a ser mais caros, pois envolvem o uso de grandes quantidades de energia térmica, radiação de alta energia e pressão mecânica, para reduzir o material a granel em partículas em nanoescala (Rashidi *et al*., 2024). Alguns dos métodos físicos geralmente utilizados são Condensação de Gás Inerte, Ablação e Pirólise a Laser, Deposição Física de Vapor, e Moagem de Bolas de Alta Energia (Kumari *et al*., 2023).

Em meio aos métodos tradicionais citados anteriormente, a síntese biológica tem ganhado destaque por ser considerada mais sustentável, econômica e segura, pois envolve o uso de organismos como bactérias, fungos, leveduras, algas, plantas e resíduos agrícolas, este último sendo um dos tipos menos explorados (Dhaka *et al*., 2023; Larrañaga-Tapia *et al*., 2023; Nkosi *et al*., 2024). A síntese mediada por extratos vegetais é mais rápida e menos complexa do que a mediada por microrganismos, entretanto, apresenta desafios relacionados a reprodutibilidade devido a exploração da natureza, dependendo da espécie utilizada, e a variações sazonais que influenciam na produção de compostos bioativos, como os metabólitos secundários (Altaf *et al*., 2021; Dargah *et al*., 2024).

2.3. SÍNTESE BIOLÓGICA

Os métodos de biossíntese possuem diferenças específicas, entre as quais, uma das principais reside no tipo das substâncias envolvidas, dependentes principalmente de enzimas redutase no caso dos microrganismos, biomacromoléculas no caso das algas, e metabólitos secundários no caso das plantas (Wen *et al*., 2024). A biossíntese pode ocorrer por meio de vias intracelulares ou extracelulares, utilizando biomassa celular, extratos livres de células ou extratos vegetais (Vera *et al*., 2023; Adeleke *et al*., 2024). Os mecanismos envolvidos nestes processos decorrem da capacidade dos organismos produzir e secretar enzimas e metabólitos, como ciclosporina e lovastatina, em fungos, redutase dependente de NADH em bactérias, quinonas e proteínas aromáticas em leveduras, alginato e polifenois em algas (Yang *et al*., 2022; Dargah *et al*., 2024; Hosnijeh *et al*., 2024).

No que se refere as plantas, elas produzem uma ampla diversidade de metabólitos primários, os quais são ligados a aspectos estruturais e funcionais, e de metabólitos secundários, que possuem importância ecológica e são explorados na área farmacológica (Ali, 2021). Os metabólitos secundários são classificados em três grupos principais: terpenoides (triterpenoides, esteroides), fenólicos (flavonoides, taninos, cumarinas) e compostos contendo nitrogênio (alcaloides) (Mahajan *et al*., 2020; Yadav *et al*., 2021). Estes fitoquímicos podem ser extraídos por diferentes técnicas convencionais ou modernas, e atuam como agentes redutores, capeadores e estabilizadores na síntese nanopartículas metálicas, além de contribuírem para a sua bioatividade (Essa *et al*., 2021; Chaudhary *et al*., 2023).

Publicações científicas abordam a importância dos fitoquímicos na síntese de nanopartículas, sendo que muitas indicam que os principais responsáveis pela sua

formação são os compostos fenólicos (Salgado *et al.*, 2023). Nessa perspectiva, segundo Vera *et al*. (2023), houve uma redução significativa no conteúdo fenólico total (TPC) de extratos vegetais à medida que a síntese de nanopartículas de zinco progredia, além disto, as espécies com maior TPC e atividade antioxidante possibilitaram a obtenção de nanopós com menor tamanho de partícula e distribuição de tamanho mais uniforme. Grupos funcionais, como os compostos fenólicos, possibilitaram ainda a redução de íons de cobre por meio de ligações carbonila e hidroxila, e contribuíram para a estabilidade das nanopartículas obtidas (Mohamed, 2020).

Fatores como temperatura, pH, molaridade do precursor metálico, tempo de reação, agitação, e natureza e concentração de agentes redutores e estabilizadores são cruciais na formação das nanopartículas, pois influenciam a nucleação, o crescimento e as propriedades das partículas. Dessa forma, ajustes nas condições de síntese contribuem para a otimização do processo e para a obtenção de partículas personalizadas para aplicações em áreas específicas de interesse (Kazemi *et al*., 2023).

2.4. APLICAÇÕES

Muitos nanomateriais tem demonstrado potencial aplicabilidade no tratamento de águas residuais, na mitigação ambiental, em sistemas agrícolas, em produtos farmacêuticos, têxteis, na área médica e de alimentos, entre outros (Nguyen *et al*., 2022; Wang *et al*., 2024). Além das nanopartículas já em uso, pesquisas exploram a obtenção de novas nanopartículas e seus efeitos, a fim de aprimorar o desempenho e eficiência em diferentes aplicações, considerando fatores como tamanho, forma, composição, dosagem, via e tempo de exposição (Bhardwaj; Rath; Choudhury, 2023).

Na agricultura, as nanopartículas podem atuar na promoção do crescimento vegetal, no controle de fitopatógenos e ervas daninhas, e na tolerância a estresse hídrico, salino e térmico, favorecendo assim o aumento da produtividade e da qualidade das culturas (Saritha; Anju; Kumar, 2022; Guleria *et al*., 2023). Nesse aspecto, métodos de aplicação como o *priming* de sementes, a pulverização foliar e a incorporação no solo tem sido explorados (Balusamy *et al*., 2023).

Na área alimentícia, embalagens à base de biopolímeros, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, surgiram como uma alternativa sustentável ao uso de polímeros à base de petróleo, como polietileno, polipropileno e poliestireno (Singh *et al*., 2024). A incorporação de nanopartículas na matriz dos filmes biopoliméricos têm demonstrado melhora nas propriedades físicas, mecânicas e biológicas deste tipo de embalagens, possibilitando, por exemplo, a diminuição da permeabilidade ao vapor de água, o aumento da resistência à tração, e das atividades antimicrobiana e antioxidante (Sani *et al*., 2022; Wang *et al*., 2022).

No que se refere às ciências biomédicas e farmacêuticas, as aplicações potenciais envolvem atividade anticancerígenas, pela supressão da metástase e indução da apoptose de células cancerígenas, efeitos anti-inflamatórios, pela inibição da expressão de mediadores inflamatórios, e indução de tolerância imunológica para tratamento de doenças autoimunes (Azadpour; Khaleghi, 2024; Lekkala *et al*., 2024). Também é relatada a incorporação em cremes e pomadas para melhor cicatrização de feridas e queimaduras, em protetores solares, e em cosméticos para aumentar a vida útil, a eficácia e a textura (Mascarenhas-Melo *et al*., 2023).

Para o uso eficiente e seguro, é importante investigar seus mecanismos de ação, sua biocompatibilidade, e definir cuidadosamente critérios de aplicação, pois elas podem gerar efeitos adversos para a saúde humana e para os ecossistemas, tanto à curto, como a longo prazo (Sarkar *et al*., 2022; Wang *et al*., 2024). Um dos fatores essenciais para aplicação em ambientes biológicos, é analisar cuidadosamente a ligação das nanopartículas com proteínas presentes nos fluidos corporais, que formam a chamada Corona Proteica, capaz de afetar a absorção celular (Caracciolo, 2024; Kelle *et al*., 2025).

Assim, em meio a gama aplicações existentes, é importante destacar a importância de regulamentações rigorosas, diretrizes, padronização de testes e cuidados na manipulação e aplicação destes nanomateriais, que se usados de forma inadequada e exacerbada, podem ser prejudiciais para o ambiente e para os organismos que nele vivem (Bhardwaj; Rath; Choudhury, 2023).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento nas áreas de nanociência e da nanotecnologia possibilitaram avanços significativos no desenvolvimento de materiais, visando aplicabilidade em diversas áreas de forma otimizada e sustentável. À medida que novas possibilidades emergem, a integração entre pesquisa científica, novas tecnologias e regulamentações criteriosas torna-se cada vez mais essencial quando se trabalha com nanomateriais. Nessa perspectiva, o equilíbrio entre inovação e responsabilidade social é fundamental para que seja possível desfrutar, de forma segura e ambientalmente consciente, de produtos novos ou melhorados, provenientes deste campo tecnológico.

REFERÊNCIAS

[1] ADELEKE, B. S. et al. Biosynthesis of nanoparticles using microorganisms: a focus on endophytic fungi. **Heliyon**, v. 10, n. 21, p. 39636, 2024.

[2] ALI, B. Practical applications of jasmonates in the biosynthesis and accumulation of secondary metabolites in plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 38, p. 102205, 2021.

[3] ALIZADEH SANI, M. et al. Titanium dioxide nanoparticles as multifunctional surface-active materials for smart/active nanocomposite packaging films. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 300, p. 102593, 2022.

[4] ALTAF, M. et al. Effective inhibition and eradication of pathogenic biofilms by titanium dioxide nanoparticles synthesized using *Carum copticum* extract. **RSC Advances**, v. 11, p. 19248–19257, 2021.

[5] AZADPOUR, A.; KHALEGHI, S. Biosynthesized nanoparticles in pharmaceutical and biomedical sciences: Recent advances. **Materials Today Communications**, v. 41, p. 110741, 2024.

[6] BALUSAMY, S. R. et al. Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 21, p. 372, 2023.

[7] BARRAGÁN-OCAÑA, A.; OLVERA-TREVIÑO, M. A.; SILVA-BORJAS, P. Technological innovation for sustainable development: Is agricultural and food nanotechnology a viable alternative. **World Patent Information**, v. 75, p.102235, 2023.

[8] BAYDA, S. et al. The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical–physical applications to nanomedicine. **Molecules**, v. 25, n. 1, p. 112, 2019.

[9] BHARDWAJ, L. K.; RATH, P.; CHOUDHURY, M. A Comprehensive Review on the Classification, Uses, Sources of Nanoparticles (NPs) and Their Toxicity on Health. **Aerosol Science and Engineering**, v. 7, p. 69–86, 2023.

[10] CARACCIOLO, G. Artificial protein coronas: directing nanoparticles to targets.**Trends in Pharmacological Sciences**, v. 45, n. 7, p. 602–613, 2024.

[11] CHAERUN, S. K.; PRABOWO, B. A.; WINARKO, R. Bionanotechnology: The formation of copper nanoparticles assisted by biological agents and their applications as antimicrobial and antiviral agents. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 18, p. 100703, 2022.

[12] CHAUDHARY, J. et al. An overview of biosynthesized metal nanoparticles via medicinal plant extracts of the Moraceae family. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 52, p. 102812, 2023.

[13] CHAUSALI, N.; SAXENA, J.; PRASAD, R. Recent trends in nanotechnology applications of bio-based packaging. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 7, p. 100257, 2022.

[14] DARGAH, M. M. et al. Biomimetic synthesis of nanoparticles: a comprehensive review on green synthesis of nanoparticles with a focus on *Prosopis farcta* plant extracts and biomedical applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 332, p. 103277, 2024.

[15] DHAKA, A. et al. A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications. **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101108, 2023.

[16] EKER, F. et al. A comprehensive review of nanoparticles: From classification to application and toxicity. **Molecules**, v. 29, n. 15, p. 3482, 2024.

[17] ELZEIN, B. Nano revolution: "Tiny tech, big impact: How nanotechnology is driving SDGs progress". **Heliyon**, v. 10, n. 10, p. 31393, 2024.

[18] ESSA, H. L. et al. Biogenic copper nanoparticles from *Avicennia marina* leaves: impact on seed germination, detoxification enzymes, chlorophyll content and uptake by wheat seedlings. **PLOS ONE**, v. 16, n. 4, p. 0249764, 2021.

[19] GULERIA, G. et al. Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 194, p. 533–549, 2023.

[20] HOSNIJEH, M. S.; TAFRESHI, S. A. H.; MASOUM, S. Nanophycology, the merging of nanoscience into algal research: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 282, p. 116727, 2024.

[21] IKUMAPAYI, O. M. et al. Microfabrication and nanotechnology in manufacturing system – An overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1154–1162, 2021.

[22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 80004-1:2023 – Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms.** Genebra: ISO, 2023.

[23] JAMUNA, G. et al. Design strategies, utilization and applications of nano-engineered biomaterials for the enhancement of bioenergy: a sustainable approach. **Biochemical Engineering Journal**, v. 200, p. 109104, 2023.

[24] JOUDEH, N.; LINKE, D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 20, p. 262, 2022.

[25] KAZEMI, S. et al. Recent advances in green synthesized nanoparticles: from production to application. **Materials Today Sustainability**, v. 24, p. 100500, 2023.

[26] KELLE, D. et al. Effect of protein corona on drug release behavior of PLGA nanoparticles. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 207, p. 114611, 2025.

[27] KHAN, M. A. R. et al. A review on gold nanoparticles: biological synthesis, characterizations, and analytical applications. **Results in Chemistry**, v. 4, p. 100478, 2022.

[28] KO, W. et al. Atomic-scale manipulation and in situ characterization with scanning tunneling microscopy. **Advanced Functional Materials**, p. 1903770, 2019.

[29] KOOL, L. et al. Gold and silver dichroic nanocomposite in the quest for 3D printing the Lycurgus cup. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 11, p. 16–23, 2020.

[30] KUMARI, S. et al. A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 27, p. 1739–1763, 2023.

[31] LARRAÑAGA-TAPIA, M. et al. Green synthesis trends and potential applications of bimetallic nanoparticles towards the sustainable development goals 2030. **Nanoscale Advances**, v. 6, n. 1, p. 51–71, 2023.

[32] LEE, K. X. et al. Recent developments in the facile bio-synthesis of gold nanoparticles (AuNPs) and their biomedical applications. **International Journal of Nanomedicine**, v. 15, p. 275–300, 2020.

[33] LEKKALA, V. D. V. V. et al. Advancements in nanoparticles-based therapies for biomedical applications. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 40, p. 101365, 2024.

[34] MAHAJAN, M.; KUIRY, R.; PAL, P. K. Understanding the consequence of environmental stress for accumulation of secondary metabolites in medicinal and aromatic plants. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 18, p. 100255, 2020.

[35] MAŤÁTKOVÁ, O.; MICHAILIDU, J.; MIŠKOVSKÁ, A.; KOLOUCHOVÁ, I.; MASÁK, J.; ČEJKOVÁ, A. Antimicrobial properties and applications of metal nanoparticles biosynthesized by green methods. **Biotechnology Advances**, v. 58, p. 107905, 2022.

[36] MOHAMED, E. A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. **Heliyon**, v. 6, n. 1, p. 03123, 2020.

[37] NDABA, B. et al. metallic nanoparticles as fertilizers: an emerging precision agriculture strategy. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 1225–1242, 2022.

[38] NGUYEN, N. T. T. et al. Recent advances on botanical biosynthesis of nanoparticles for catalytic, water treatment and agricultural applications: A review. **Science of The Total Environment**, v. 827, p. 154160, 2022.

[39] NKOSI, N. C. et al. Green synthesis, characterization and application of silver nanoparticles using bioflocculant: a review. **Bioengineering**, v. 11, n. 5, p. 492, 2024.

[40] RASHIDI, M. A. et al. The emerging potential of green-synthesized nanoparticles as colorimetric sensors for ammonia detection. **Microchemical Journal**, v. 196, p. 109646, 2024.

[41] RODRIGUES, M. S. et al. Gas sensors based on localized surface plasmon resonances: Synthesis of oxide films with embedded metal nanoparticles, theory and simulation, and sensitivity enhancement strategies. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5388, 2021.

[42] SALGADO, P. et al. Green synthesis of Ag/Ag_2O nanoparticles on cellulose paper and cotton fabric using *Eucalyptus globulus* leaf extracts: toward the clarification of formation mechanism. **Surfaces and Interfaces**, v. 40, p. 102928, 2023.

[43] SARITHA, G. N. G.; ANJU, T.; KUMAR, A. Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100457, 2022.

[44] SARKAR, M. R. et al. Recent advances in nanomaterials based sustainable agriculture: An overview. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 18, p. 100687, 2022.

[45] SELAMANI, A.; KOVAČEVIĆ, D.; BOHINC, K. Nanoparticles: From synthesis to applications and beyond. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 303, p. 102640, 2022.

[46] SINGH, A. K. et al. Non-conventional starch nanoparticles: Novel avenues towards improving sustainability of the food packaging sector. **Trends in Food Science & Technology**, v. 143, p. 104273, 2024.

[47] VERA, J. et al. Antioxidant activity as an indicator of the efficiency of plant extract-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles. **Antioxidants**, v. 12, n. 4, p. 784, 2023.

[48] VISHWANATH, R.; NEGI, B. Conventional and green methods of synthesis of silver nanoparticles and their antimicrobial properties. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 4, p. 100205, 2021.

[49] WANG, C. et al. Bioactive and functional biodegradable packaging films reinforced with nanoparticles. **Journal of Food Engineering**, v. 312, p. 110752, 2022.

[50] WANG, Y. L. et al. Oxidative stress and potential effects of metal nanoparticles: A review of biocompatibility and toxicity concerns. **Environmental Pollution**, v. 346, p. 123617, 2024.

[51] WANI, S. U. D. et al. A review on nanoparticles categorization, characterization and applications in drug delivery systems. **Vibrational Spectroscopy**, v. 121, p. 103407, 2022.

[52] WEN, J. et al. Metallic nanoparticles synthesized by algae: synthetic route, action mechanism, and the environmental catalytic applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 111742, 2024.

[53] YADAV, B. et al. Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: a review. **Gene Reports**, v. 23, p. 101040, 2021.

[54] YANG, Y. et al. Microbial-enabled green biosynthesis of nanomaterials: Current status and future prospects. **Biotechnology Advances**, v. 55, p. 107914, 2022.

[55] ZAHOOR, M. et al. A Review on Silver Nanoparticles: Classification, Various Methods of Synthesis, and Their Potential Roles in Biomedical Applications and Water Treatment. **Water**, v. 13, n. 16, p. 2216, 2021.

[56] ZULFIQAR, F. et al. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: advantages and limitations. **Plant Science**, v. 289, p. 110270, 2019.

Capítulo 2

Ora-pro-nóbis (Pereskia aculeata Miller*): compostos bioativos, métodos de extração, interações alelopáticas e aplicações em nanotecnologia e antimicrobiana*

Adriá Braun Vieira[1]
Mayara Maria de Souza[2]
Carina Contini Triques de Almeida[3]
Mônica Lady Fiorese[4]
Patricia da Costa Zonetti[5]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[6]

Resumo: A *Pereskia aculeata* Miller é uma planta nativa conhecida popularmente como ora-pro-nóbis, tem alto valor medicinal e nutricional. As suas folhas são amplamente utilizadas na alimentação e na medicina popular devido à presença de compostos bioativos. A extração desses compostos pode ser realizada por métodos tradicionais, como infusão e Soxhlet, ou por métodos modernos, como ultrassom, que oferece uma extração sustentável com maior eficiência e menor impacto ambiental. Os extratos vegetais possuem ampla aplicabilidade, tanto na área da saúde quanto na agricultura, como bioestimulantes agrícolas. Além disso, eles também podem ser utilizados pela nanotecnologia verde, especialmente na síntese de nanopartículas metálicas. O uso sustentável dessas tecnologias impulsiona o desenvolvimento de produtos biotecnológicos, tornando a ora-pro-nóbis uma alternativa promissora para diversos setores científicos e industriais.

Palavras-chaves: ora-pro-nóbis. Compostos bioativos. Extração sustentável. Bioestimulantes agrícolas. Nanotecnologia verde.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0006-9133-3784
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0000-0444-1442
[3] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo -PR https://orcid.org/0000-0002-0397-958X
[4] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0001-5250-7178
[5] Departamento de Ciências Agronômicas da Universidade Federal do Paraná (UFPR)/ Palotina – PR https://orcid.org/0000-0002-0092-1016
[6] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

A *Pereskia aculeata* Miller, conhecida como ora-pro-nóbis (OPN), é uma planta com notáveis propriedades medicinais e nutricionais (Kinupp e Barros, 2008), despertando crescente interesse científico devido ao seu alto valor proteico (Takeiti *et al.,* 2009) e à presença de compostos bioativos como flavonoides, alcaloides e taninos (Jardim *et al.*, 2021). Suas folhas são amplamente usadas no combate à desnutrição e anemia (Cruz *et al.*, 2020), e seu potencial é reconhecido tanto na alimentação quanto na medicina popular, além de se destacar por suas propriedades antioxidantes (Moraes et al., 2019) e antimicrobianas (Souza *et al.,* 2016).

Nesse contexto, para obtenção dos compostos bioativos é importante definir o método de extração, podendo ser tradicional ou moderno. Embora os métodos tradicionais, como infusão e Soxhlet, sejam amplamente utilizados pela simplicidade e custo baixo (Castro; Priego-Capote, 2010; Oliveira, 2020), eles podem ser menos eficientes. Em contrapartida, métodos modernos, como a extração assistida por ultrassom, oferece maior eficiência e sustentabilidade (Sousa; Gasparoti; Paula, 2022), permitindo a extração de compostos bioativos sem gerar impactos ambientais.

Diante disso, é importante ressaltar que depois de obtidos os extratos vegetais podem ser aplicados, por exemplo, na área da saúde como agente antimicrobiano (Macedo et al., 2023) e na agricultura como bioestimulante (Carvalho *et al.*, 2021), de modo a auxiliar no crescimento das plantas e aumento da produtividade.

E, ainda na síntese verde de nanopartículas, os extratos vegetais são utilizados como fontes naturais em uma abordagem promissora que se destaca por sua biossegurança e sustentabilidade (Dúran et al., 2011; Oselusi, 2025), oferecendo alternativas para a criação de nanomateriais. Assim, este estudo tem como objetivo identificar os compostos bioativas da *P. aculeata*, determinar a melhor estratégia para sua extração e prospectar novas possibilidades de aplicação dessa planta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A PLANTA ORA-PRO-NÓBIS (*Pereskia aculeata* MILLER)

O Brasil é reconhecido como um dos países com maior diversidade biológica em todo o mundo, com aproximadamente 38.000 espécies de vegetais já reconhecidas (Flora e Funga do Brasil, 2023). Dentre estas destacam-se 230 cactáceas, distribuídas em 34 gêneros, das quais 184 são endêmicas, encontradas com maior predomínio nas regiões leste e sul (Plano de Ação Nacional para a Conservação das Cactaceas, 2011).

O gênero *Pereskia* recebeu esta denominação por Miller em 1974, e apresenta particularidades que o diferenciam dos demais gêneros dentro da família Cactaceae, como hastes não suculentas, folhas grandes e aréolas auxiliares com espinhos (Francisco, 2018).

A *Pereskia aculeata* Miller é uma trepadeira semi-lenhosa, que pode atingir até 10 metros de comprimento, o caule e os ramos apresentam espinhos. O fruto é carnoso, oval ou redondo, e as flores apresentam coloração branca e amarela com aroma de limão. Já as folhas têm cerca de sete centímetros de comprimento e três centímetros de largura, são simples, simétrica, e com textura carnosa, composta por 70% água (Rosa; Souza, 2003; Ruppelt *et al.*, 2015).

A *P. aculeata* é conhecida por seu nome popular ora-pro-nóbis (OPN) que no latim significa “rogai por nós”. Outros nomes populares que também podem ser atribuídos a

espécie são rosa-madeira, trepadeira-limão e carne-de-pobre ou carne verde, uma vez que na matéria seca possui 28% de proteína, valor acima que as fontes vegetais consumidas diariamente como o feijão, milho, espinafre, couve e alface (Takeiti *et al*., 2009), e fontes de origem animal como carne, peixe e ovos (Maciel *et al.,* 2021).

Devido às suas propriedades e ao alto valor proteico, a OPN pode ser considerada tanto uma planta medicinal quanto uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC). Essas plantas geralmente apresentam maiores teores de minerais, fibras, proteínas e compostos antioxidantes em comparação com plantas domesticadas (Kinupp; Barros, 2008; Silveira, 2016).

As folhas de OPN apresentam mucilagem (Piva *et al.*, 2025) e contêm minerais como potássio, cálcio, ferro, enxofre, manganês, fósforo, magnésio, zinco, cobre e vitamina C (Almeida *et al.*, 2014). Elas também são ricas em aminoácidos essenciais, como histidina, arginina, treonina, valina, metionina, isoleucina, leucina, fenilalanina, lisina e triptofano (Zem *et al.*, 2019). O principal uso das folhas envolve o consumo fresco ou seco, podendo ser facilmente incorporadas na forma de farinha em saladas, refogados, pães, bolos, sopas e sucos (Ferreira *et al.*, 2024). É recomendada no combate à fome, desnutrição e anemia (Cruz *et al.*, 2020).

Deste modo, devido ao seu fácil acesso, propagação e cultivo, e às suas atividades biológicas, existem muitos estudos desenvolvidos com a OPN que buscam quantificar e identificar seus compostos, bem como avaliar suas atividades biológicas (Moraes et al., 2019; Garcia et al. 2019; Soares, Castro e Martins, 2022; Ciríaco, Mendes e Carvalho, 2023).

2.1.1. COMPOSTOS BIOATIVOS DA ORA-PRO-NÓBIS

A Resolução RDC n. 243/18 define substância bioativa como “um nutriente ou não nutriente consumido normalmente como componente de um alimento, que possui ação metabólica ou fisiológica específica no organismo humano” (Brasil, 2018, não paginado). Os metabólitos secundários podem ser divididos em três principais grupos: compostos nitrogenados, fenólicos e terpenos (Borges; Amorim, 2020).

A OPN é rica em minerais, vitaminas e aminoácidos, além de conter diferentes compostos metabólitos secundários como os taninos, flavonóides, alcaloides e saponinas (Jardim *et al.*, 2021), carotenoides e saponinas (Almeida *et al.*, 2014).

A capacidade antioxidante das folhas de OPN tem se mostrado notável, assim como a concentração de seus compostos fenólicos, que são os principais responsáveis pela prevenção ou mitigação de diversos danos oxidativos. Além disso, a elevada concentração de antioxidantes torna as folhas de OPN uma alternativa valiosa para o enriquecimento de alimentos e a promoção de uma alimentação saudável, sugerindo seu potencial como aditivo alimentar (Ciríaco, Mendes e Carvalho, 2023).

Foi encontrado no extrato apolar de OPN elevada atividade antioxidante e identificados 11 compostos pertencentes aos terpenóides e compostos fenólicos, sendo eles 2,4-Di-tercbutilfenol, isocanfano, fitol, escaleno, γ-tocoferol, vitamina E, α-Tocoferolquinona, campesterol, γ-sitosterol, fucosterol e lupeol (Torres *et al.*, 2021).

Em outro estudo também foram identificados compostos, sendo eles: dois ácidos fenólicos derivados do ácido caféico e oito flavonóides derivados de quercetina, kaempferol e isorhamnetina glicosídeo (Garcia *et al.*, 2019). Essas moléculas são

quimioprotetoras e normalmente são empregadas na indústria farmacêutica (Farias; Araújo, 2014) e na cosmética para a prevenção do envelhecimento cutâneo (Henrique; Lopes, 2017).

2.1.2. APLICAÇÃO DOS BIOATIVOS DE ORA-PRO-NÓBIS

Diversos estudos exploram as aplicações da OPN como alimento, destacando suas propriedades funcionais (Queiroz *et al.*, 2015; Assis *et al.*, 2021; Pocai *et al.*, 2021; Francelin *et al.*, 2021; Prado *et al.*, 2022). Um estudo com farinha de OPN na dieta mostrou benefícios como redução de peso, gordura visceral, colesterol total e triglicerídeos (Barbalho *et al.*, 2016).

O potencial impacto positivo da OPN é evidente em diversas aplicações, abrangendo não apenas a alimentação, mas também desempenhando um papel significativo na promoção da saúde. A avaliação da atividade antimicrobiana da OPN foi observada em diversas cepas de microrganismos, sendo bactérias como *Klebsiella pneumoniae* (Colacite *et al.*, 2022), *Staphylococcus aureus* (Macedo *et al.*, 2023), *Bacillus cereus, Pseudomonas aeruginosa* (Passos, 2022), e fungos como *Aspergillus versicolor* e *Penicillium citrinum* (Souza *et al.*, 2016). Em tais avaliações, observou-se um potencial inibição do crescimento microbiano.

Além disso, na esfera da saúde, a OPN desperta interesse devido à sua atividade biológica. Estudos nessa área apresentam sua atividade antitumoral e antinociceptiva (Pinto *et al.*, 2015), ação cicatrizante por meio de formulações em pomada (Barros *et al.*, 2010), e neuroprotetora com propriedade anti-inflamatória e anticolinérgica (Torres *et al.*, 2021).

É importante destacar que o uso de seus bioativos também poderia ser integrado a outras áreas, como é o caso da agronômica, em que ocorre uma crescente expansão de pesquisas voltadas a obtenção de bioestimulantes provenientes de extratos vegetais (Rehman *et al*., 2017; Desoky *et al*., 2020; Carvalho *et al*., 2021).

2.2. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS

2.2.1. MÉTODOS TRADICIONAIS

Os métodos de extração tracionais foram utilizados ao longo de muitos anos, em geral são simples e não precisam de equipamentos especializados. Um exemplo é a infusão, trata-se uma extração direta na qual o biomassa vegetal entra em contato com a água quente, sendo comumente utilizada no preparo de chás, muito parecido com este método está a decocção, que se diferencia unicamente pelo fato de que o material vegetal deve ser fervido junto com a água (Oliveira, 2020).

Outra forma de extração direta é a maceração, em que a biomassa vegetal permanece em contato com o solvente. Esse processo pode ser estático ou dinâmico, quando envolve a agitação dos materiais (Marques, 2005). Durante a maceração, é importante garantir que a biomassa vegetal esteja bem triturada para aumentar a superfície de contato com o solvente, melhorando a eficiência da extração. Esse processo envolve o uso de diferentes solventes, que auxiliam na separação das substâncias ativas por meio da diferença de polaridade (Soares *et al.*, 2016).

Além destes métodos, o Soxhlet, desenvolvido em 1879, tem sido utilizado por mais de um século. Ele é reconhecido por ser um processo extrativo exaustivo e altamente eficaz para a recuperação dos componentes desejados, embora seja mais demorado e consuma mais energia se comparado aos métodos modernos (Castro; Priego-Capote, 2010). Cada um desses métodos, apesar de simples, continuam sendo relevantes e amplamente utilizados no ambiente laboratorial devido à sua acessibilidade e eficiência.

2.2.2. MÉTODOS MODERNOS

Os métodos modernos para extração de compostos buscam eficiência, seletividade e sustentabilidade, e se baseiam em processos físicos e químicos para a separação das moléculas funcionais. Eles levam em conta os princípios da química verde que busca por solventes alternativos e processos mais eficientes (Tsukui; Rezende, 2014).

Entre esses métodos está a extração por fluido supercrítico (EFS), que utiliza um fluido em condições críticas de temperatura e pressão (Sousa, Gasparoti e Paula, 2022), e a extração por líquido pressurizado (ELP), que mantém o solvente em estado líquido sob alta pressão, mesmo em temperaturas elevadas (Rodrigues, 2021). Ambos os métodos permitem a redução do tempo de extração e aumento do rendimento, apesar dos altos custos dos equipamentos (Sousa; Gasparoti; Paula, 2022; Cunha *et al.*, 2020).

A extração com água subcrítica (EAS) opera com água em estado líquido sob alta pressão e temperaturas entre 100°C e 374°C, eliminando a necessidade de solventes tóxicos (Souza; Souza; Oliveira, 2022). A extração aquosa assistida por enzimas (EAAE), por sua vez, utiliza enzimas para degradar as paredes celulares das plantas, resultando em produtos refinados com menor uso de energia (Heemann *et al*., 2019). Esses métodos são sustentáveis e eficientes, aproveitando recursos naturais e enzimáticos para a extração de compostos bioativos.

Além desses, o método extração assistida por micro-ondas (EAM) se baseia em princípios físicos e químicos que relacionam temperatura, estrutura molecular, ligação química e polarização, permitindo aquecimento eficiente de dentro para fora (Tsukui; Rezende, 2014). Outro método é a extração assistida por ultrassom (EAU), que utiliza ondas ultrassônicas para aumentar a cavitação e a transferência de massa, melhorando a eficiência e a seletividade da extração (Silva, 2022).

2.2.3. EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM

Dentre os métodos modernos disponíveis, a extração assistida por ultrassom se destaca como uma alternativa eficiente e ecologicamente sustentável (Passos, 2022). Além disso, é considerada uma opção mais econômica em comparação com outros métodos modernos como é o caso da extração por fluido supercrítico (Sousa; Gasparoti; Paula, 2022).

O ultrassom, com frequência de 20 kHz, utiliza ondas ultrassônicas de alta potência para romper tecidos vegetais e expor seus componentes ao solvente. A propagação das ondas forma microbolhas que, ao se romperem, geram forças de cisalhamento, aumentando a permeabilidade dos tecidos vegetais e a solubilização dos compostos ativos (Silva, 2022).

A extração assistida por ultrassom pode ser conduzida de duas maneiras: através de banho ultrassônico ou sonda/ponteira ultrassônica. No banho ultrassônico, a amostra

vegetal é submetida indiretamente à energia ultrassônica via água, requerendo maiores frequências e potências para uma extração eficaz. Já na extração por sonda, o gerador de ondas ultrassônicas é inserido diretamente no recipiente contendo a amostra, emitindo ondas de pressão diretamente sobre o tecido vegetal. O uso de sonda para emissão das ondas ultrassônicas em biomoléculas demonstrou melhor desempenho em comparação com o banho ultrassônico (Sousa *et al.*, 2022).

O método de extração por ultrassom utilizando sonda/ponteira se destaca pelo curto tempo de extração, facilidade de operação e elevada capacidade de solubilização dos compostos, independentemente do solvente utilizado. Isso demonstra a significativa importância desse método para futuros estudos e aplicações nas esferas científica e industrial (Silva, 2022).

2.3. INTERAÇÃO ENTRE PLANTAS: ALELOPATIA

As plantas interagem entre si por meio de processos como competição, facilitação e comunicação química, desempenhando papéis fundamentais na composição das comunidades vegetais e ecossistemas. A alelopatia é uma dessas interações, termo derivado das palavras gregas allelon (mútuo) e pathos (prejuízo), definido por Molisch em 1937. Posteriormente, em 1984, Rice caracterizou a alelopatia como a liberação de substâncias químicas no ambiente que podem inibir ou estimular o crescimento e desenvolvimento de outras plantas (Pires; Oliveira, 2011).

Em qualquer processo alelopático, uma planta doadora libera substâncias químicas no ambiente que podem causar efeitos sinérgicos ou antagônicos na fisiologia da germinação, no crescimento ou no desenvolvimento da planta receptora. O efeito alelopático na natureza resulta da ação conjunta de vários aleloquímicos, e não apenas de um único composto. Assim como, a complexidade do processo é dependente de diversas variáveis como o mecanismo de liberação, a estabilidade no meio e a forma como será absorvido (Barrales-Cureño *et al*., 2022).

Compreender a natureza química dessas substâncias, também chamadas de "aleloquímicos", é essencial para entender a alelopatia. Em geral, esses compostos são metabólitos secundários derivados do metabolismo primário e são liberados no ambiente por meio de lixiviação, volatilização ou decomposição (Santos, 2021).

Os metabólitos secundários podem ser estudados na alelopatia por meio da metabolômica, que identifica e quantifica sistematicamente todos os metabólitos em sistemas biológicos, refletindo suas características fisiológicas e bioquímicas. Alguns metabólitos influentes no processo alelopático são os compostos fenólicos, flavonoides e saponinas. Algumas plantas conhecidas por seus metabolitos com propriedades alelopáticas são alfafa, centeio, sorgo, arroz, canola e trigo (Barrales-Cureño *et al*., 2022).

Na natureza, os aleloquímicos liberados pelas plantas podem ter efeitos positivos ou negativos, afetando tanto plantas daninhas quanto cultivadas (Silva, 2018). Esse conhecimento revela um potencial significativo para o desenvolvimento de produtos agrícolas com propriedades bioestimulantes ou bioherbicidas.

2.3.1. EXTRATOS VEGETAIS COMO BIOESTIMULANTES

Na agricultura moderna há uma busca por estratégias que ajudem a aumentar a produtividade, eficiência e lucratividade, e que amenizem os efeitos negativos sofridos

durante o plantio, ou seja, que garantam uma melhoria no rendimento. Desta forma, o uso de bioestimulantes é uma excelente alternativa (Cavalcante et al., 2020).

Os bioestimulantes são substâncias naturais que podem ser aplicados diretamente nas plantas, sementes ou solo com o objetivo de melhorar as condições fisiológicas vegetais como "melhorar a qualidade de sementes, estimular o desenvolvimento radicular, favorecer o equilíbrio hormonal da planta e a germinação mais rápida e uniforme, interferir no desenvolvimento vegetal" (Programa Nacional de Bioinsumos, 2020, não paginado) e que promovam a tolerância a estresses abióticos.

Em sua composição, os bioestimulantes podem apresentar aminoácidos, fitohormônios, vitaminas, macro e micronutrientes que são elementos químicos essenciais para o crescimento das plantas. Estes compostos podem ser provenientes de extratos vegetais e demonstrar ampla composição devido a diversidade de moléculas vegetais que podem ser extraídas e aplicadas.

Um dos extratos vegetais mais estudados na aplicação como bioestimulante, é o extrato de moringa (*Moringa oleífera*) (Rehman *et al.*, 2017). Mas também há estudos com a aplicação de outras plantas como o alho (*Allium sativum*) (Eldeen, 2015), funcho (*Foeniculum vulgare*) (Desoky *et al.,* 2020), e alcaçuz (*Glycyrrhiza glabra*) (Desoky *et al*., 2019).

Os produtos incorporados às sementes estão se tornando mais comuns a cada ano, sendo assim a aplicação de bioestimulantes no tratamento de sementes é uma alternativa viável que oferece resultados positivos, além de representar menor custo e uma distribuição mais uniforme (Frezato *et al.*, 2021).

2.4. NANOTECNOLOGIA

A capacidade de manipulação de átomos e moléculas no campo nanométrico foi confirmada em 1959 pelo físico norte-americano Richard Feynman com sua palestra durante a conferência da Sociedade Americana de Física. Já o termo "nanotecnologia" foi utilizado pela primeira vez em 1974 pelo professor Norio Taniguchi (Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022).

O termo *nano* deriva do grego antigo e significa "anão". Em relação ao tamanho mensurável, 1 nanômetro (nm) equivale a bilionésima parte do metro (1×10^{-9} m), desta forma uma partícula nesta escala pode ser chamada de nanopartícula. De acordo com a International Standardization Organization (ISO) na normativa 27687 publicada em 2008 o tamanho das nanoparticulas (NPs) se encaixam na escala nanométrica de 1-100 nm (Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022).

Uma breve definição de nanotecnologia "é a tecnologia que busca o entendimento de um sistema em nanoescala, com precisão de átomo a átomo, para criar estruturas com uma organização diferenciada" que podem apresentar comportamentos e propriedades distintas daquelas encontradas em materiais conhecidos (Filho; Backx, 2020, p. 2).

A nanotecnologia é uma ciência multidisciplinar, abrange áreas como tecnologia da informação, medicina, engenharia, química, física e biologia. Reconhecida como a tecnologia do futuro, ela sustenta o desenvolvimento econômico e possibilita a criação rápida de inúmeros nanoprodutos e nanoaplicações em diversas áreas das ciências (Hupffer; Pinto; Quevedo, 2021).

2.4.1. SÍNTESE VERDE

A síntese verde representa um avanço significativo no campo da nanotecnologia, utilizando métodos para a produção de nanopartículas que priorizam a sustentabilidade ambiental e a redução do uso de substâncias tóxicas. Fundamentada na utilização de recursos naturais e em condições de reação ambientalmente favoráveis, a síntese verde visa substituir os processos físicos e químicos convencionais, alinhando-se aos princípios da química verde (Oliveira, 2018).

A obtenção de nanopartículas através da síntese verde envolve o uso de extratos vegetais, microrganismos, ou outras fontes biológicas como agentes redutores e estabilizadores. Os extratos vegetais, em particular, contêm uma variedade de metabólitos secundários, tais como flavonoides, taninos e alcaloides, que podem desempenhar papéis cruciais na formação das nanopartículas. Estes compostos podem influenciar diretamente o processo de síntese, promovendo a redução dos íons metálicos e a estabilização das nanopartículas formadas (Dúran *et al*., 2011), resultando em produtos que são mais seguros e biocompatíveis (Skłodowski *et al*., 2023).

Um exemplo de síntese verde é a utilização de chá verde (*Camellia sinensis*) para a formação de nanopartículas de cobre com 6,6 nm, os componentes bioativos presentes no chá verde facilitaram a formação das nanopartículas de cobre (Pelegrino, 2020). Outro exemplo envolve o uso de extrato de folhas de *Moringa oleifera* para a formação de nanopartículas de prata com tamanhos entre 15-29 nm (Mohammed *et al*., 2022).

A síntese química requer substâncias estabilizadoras, e a síntese física utiliza processos como deposição, queima e moagem. Ambas apresentam como desvantagens o longo tempo de preparo, a necessidade de condições extremas, alto consumo de energia e geração de resíduos tóxicos (Jalab *et al*., 2021). Portanto, a síntese verde se destaca pela substituição de substâncias químicas tóxicas e condições de reações mais suaves, quando comparada com as sínteses química e física, apresentando sustentabilidade com a utilização de produtos naturais, e oferecendo um método mais seguro e ecologicamente correto para a produção de nanopartículas.

2.4.2. NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

Diversos métodos de síntese são utilizados na produção de nanopartículas. Essas nanopartículas podem ser divididas em duas categorias principais: orgânicas e inorgânicas. As nanopartículas orgânicas incluem aquelas formadas a partir de carbono, enquanto as inorgânicas abrangem variedades como as magnéticas, metálicas e semicondutoras (Mendes, 2015).

Entre as nanopartículas metálicas mais estudadas estão as de prata (AgNPs), cobre (CuNPs), zinco (NPZnO) e ouro (AuNPs), que têm um amplo espectro de aplicações. Exemplos de suas utilizações incluem embalagens de alimentos (Ferreira, 2023), liberação controlada de fármacos (Bezerra *et al.*, 2022), ação bioestimulante e defesa contra fitopatógenos na agricultura (Kaningini *et al*., 2022), além do desenvolvimento de novas tecnologias.

Uma aplicação que tem se destacado, dentro da área da saúde, é o potencial antimicrobiano das nanopartículas metálicas, amplamente documentado em diversos estudos (Correa *et al*., 2020; Nyabola *et al*., 2020; Skłodowski *et al*., 2023; Korkmaz *et al*., 2024). A integração de propriedades físicas e químicas únicas consolida o papel dessas

nanopartículas como soluções inovadoras para desafios contemporâneos, como a crescente resistência bacteriana.

2.4.3. NANOPARTÍCULAS METÁLICAS COMO AGENTES ANTIMICROBIANOS

O uso de nanopartículas de metais nobres, especialmente AuNPs, AgNPs e PtNPs, representa uma nova abordagem para combater microrganismos resistentes e reduzir o uso de antibióticos (Susanti, 2022). As nanopartículas provenientes da síntese verde de óxido de cobre mostraram eficácia na erradicação de biofilmes multirresistentes por *Klebsiella pneumoniae* e *Helicobacter pylori* (Naseer *et al*., 2021). Assim como, as AgNPs sintetizadas com o extrato de *Ficus carica* inibiram os biofilmes de *B. subtilis* e *S. infantis* (Korkmaz *et al*., 2024).

As AgNPs, em particular, destacam-se por sua alta relação área superficial/volume, o que potencializa sua eficácia biológica, tornando-as ideais para aplicações antimicrobianas (Oselusi *et al*., 2025). Essas nanopartículas são amplamente empregadas como agentes antibacterianos, sendo eficazes contra diversos microrganismos (Ankudze; Neglo; Nsiah, 2023). Estudos relatam que as AgNPs possuem a capacidade de se fixar rapidamente na membrana celular bacteriana, penetrar no citoplasma e causar morte celular por desnaturação (Nyabola *et al*., 2020).

Além disso, as AgNPs podem apresentar umas estruturas prismáticas com múltiplos vértices (Mendes, 2015). Essa característica estrutural facilita ainda mais a interação com a membrana celular, resultando em danos significativos. Dessa forma, devido à sua característica quando combinada com os métodos de síntese sustentável, como é o caso da síntese verde, permite a incorporação das propriedades bioativas dos extratos vegetais, o que reforça a eficácia no controle de microrganismos patogênicos.

2.4.3.1. NANOPARTÍCULAS DE PRATA FRENTE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS

A biossíntese de AgNPs a partir do extrato aquoso de tamarindo-veludo *(Dialium cochinchinense*) mostrou eficácia na inibição do crescimento microbiano de diversas bactérias e fungos, incluindo *E. coli* (ATCC 25.922), *K. pneumoniae* (NCTC 13.440), MRSA (NCTC 12.493), *S. mutans* (ATCC 700.610), *S. typhi* (ATCC 14.028), *P. aeruginosa* (ATCC 4853), *A. niger* (ATCC 6275) e *Candida albicans* (ATCC 90.028) (Ankudze; Neglo; Nsiah, 2023).

As AgNPs sintetizadas com extrato aquoso de *Aspilia pluriseta* apresentaram maior inibição do crescimento de duas bactérias Gram-positivas, *Bacillus subtilis* e *Staphylococcus aureus*, duas Gram-negativas, *Escherichia coli* e *Pseudomonas aeruginosa*, e ação inibitória contra *Candida albicans*, em comparação com a ação do extrato sozinho (Nyabola *et al*., 2020).

As AgNPs empregando o extrato de folhas de *Justicia spicigera* com tamanho de 86-100 nm apresentaram ação antibacteriana eficaz frente *B. cereus, K. pneumoniae, E. aerogenes*, e antifúngicas frente *A. alternata* e *M. phaseolina* (Bernardo-mazariegos *et al*., 2019).

As AgNPs biossintetizadas usando extrato de Anagallis monelli com tamanho médio de 22 nm, apresentaram inibição no crescimento de *S. aureus, M. luteus, E. coli, S. marcescens* e *K. pneumoniae* (Dridi *et al*., 2022).

Assim como, as AgNPs produzidas por síntese verde com o extrato aquoso das folhas de *Ehretia rigida* inibiram efetivamente o crescimento de *S. aureus, S. pyogenes, A. baumannii, E. cloacae, E. coli, K. pneumoniae, P. aeruginosa* e *C. albicans* (Oselusi *et al.,* 2025).

A biossíntese verde dessas nanopartículas, utilizando extratos de plantas, apresenta uma alternativa sustentável e eficaz aos métodos convencionais de síntese química e física. Neste contexto, ora-pro-nóbis, uma planta conhecida por suas propriedades nutricionais e medicinais, pode servir como uma fonte verde eficiente para a síntese de AgNPs, potencialmente aumentando suas ações antimicrobianas. Isso representa uma importante estratégia no combate às infecções causadas por microrganismos resistentes, ampliando as possibilidades de tratamento e prevenção de doenças.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A *P. aculeata* se destaca como uma fonte promissora de compostos bioativos com propriedades antioxidantes e antimicrobianas, evidenciando seu potencial para aplicações em alimentos, saúde e agricultura. A escolha do método de extração é essencial para otimizar a obtenção desses compostos, garantindo maior eficiência e sustentabilidade. Além disso, a síntese verde de nanopartículas a partir dos extratos vegetais representa uma alternativa segura e ambientalmente responsável. Pesquisas futuras são essenciais para expandir suas aplicações e fortalecer seu uso em diferentes setores, consolidando a ora-pro-nóbis como um recurso estratégico para o desenvolvimento de novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

[1] ALMEIDA, M. E. F. et al. Chemical characterization of the nonconventional vegetable known as ora-pro-nobis. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 431-439, 2014.

[2] ANKUDZE, B.; NEGLO, D.; NSIAH, F. Green synthesis of silver nanoparticles from discarded shells of velvet tamarind (*Dialium cochinchinense*) and their antimicrobial synergistic potentials and biofilm inhibition properties. **Biometals**, v. 37, p.143–156, 2024.

[3] ASSIS, R. A., SABIONI, S. C.; OLIVEIRA, A. R. M. F. Potencialidade medicinal e alimentícia da ora-pro-nobis (*Pereskia acuelata*). In SOUZA, C. S.; SABIONI, S. C. Tópicos especiais em estudos agroecológicos na região sul da bahia. **Científica digital**, 2021. p. 157-173.

[4] BARBALHO, S. M. et al. *Pereskia aculeata* Miller Flour: Metabolic Effects and Composition. **Journal of Medicinal Food**, v. 19, n. 9, p. 890–894, 2016.

[5] BARROS, K. N. et al. Desenvolvimento de formulação de uso tópico com ação cicatrizante contendo extrato de **Pereskia aculeata**. **Iniciação Científica CESUMAR**, v. 12, n. 1, p. 29-37, 2010.

[6] BARRALES-CUREÑO, H. J et al. Metabolomics studies of allelopathy: a review. **Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas**, Bogotá, v. 51, n. 1, p. 243-274, 2022.

[7] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC n. 243, de 26 de julho de 2018. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos suplementos alimentares. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 27 jul. 2018, não paginado.

[8] BEZERRA, T. P. W.; BANDEIRA, A. R. G.; LIMA, S. H. P. de; ANDRADE, P. L. de. A nanotecnologia aplicada ao desenvolvimento de fármacos: revisão integrativa da literatura. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 14, p. e99111436115, 2022.

[9] BERNARDO-MAZARIEGOS, Erick et al. Silver nanoparticles from Justicia spicigera and their antimicrobial potentialities in the biocontrol of foodborne bacteria and phytopathogenic fungi**. Revista Argentina de microbiología**, v. 51, n. 2, p. 103-109, 2019.

[10] BORGES, L. P.; AMORIM, V. A. Metabólitos secundários de plantas. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, 2020.

[11] CASTRO, M. L.; PRIEGO-CAPOTE, F. Soxhlet extraction: Past and present panacea. **Journal of Chromatography A**, v. 1217, n. 16, p. 2383-2389, 2010.

[12] CARVALHO, R. S. et al. Extratos vegetais na agricultura e suas aplicações no tratamento de sementes. **Ciência Rural**, v. 52, 2021.

[13] CAVALCANTE, W. S. S. et al. Eficiência dos bioestimulantes no manejo do déficit hídrico na cultura da soja. **Irriga**, v. 25, n. 4, p. 754-763, 2020.

[14] CIRÍACO, A. C. DE A.; MENDES, R. DE M.; CARVALHO, V. S. Antioxidant activity and bioactive compounds in ora-pro-nóbis flour (*Pereskia aculeata* Miller). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 26, p. e2022054, 2023.

[15] COLACITE, J. et al. Avaliação da atividade antimicrobiana de diferentes extratos das folhas de Ora-Pro-Nóbis Evaluation of the antimicrobial activity of different extracts of Ora-Pro-Nobis Leaves. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 33207-33216, 2022.

[16] CORREA, M. G. et al. Antimicrobial metal-based nanoparticles: A review on their synthesis, types and antimicrobial action**. Beilstein journal of nanotechnology**, v. 11, n. 1, p. 1450-1469, 2020.

[17] CUNHA, E. S. L. et al. Extração com líquido pressurizado: montagem de uma unidade multipropósito laboratorial e desenvolvimento de um procedimento operacional padrão (POP). **Revista Brasileira de Iniciação Científica (RBIC)**, v. 7, n.6, p. 134-149, 2020.

[18] CRUZ, A.F.P. et al. Plantas alimentícias não convencionais: utilização das folhas de "ora-pro-nobis" (*Pereskia aculeata* mill, *Cactaceae*) no consumo humano. **Visão Acadêmica**, v. 21, n. 3, 2020.

[19] DESOKY, E-S. M. et al. Stimulating antioxidant defenses, antioxidant gene expression, and salt tolerance in Pisum sativum seedling by pretreatment using licorice root extract (LRE) as an organic biostimulant. **Plant Physioloy and Biochemisty**, v. 142, p. 292-302, 2019.

[20] DESOKY, E-S. M. et al. Fennel and ammi seed extracts modulate antioxidante defence system and alleviate salinity stress in cowpea (*Vigna unguiculata*). **Scientia Horticulturae**, v. 272, 2020.

[21] DÚRAN, N. et al. Mechanistic aspects in the biogenic synthesis of extracellular metal nanoparticles by peptides, bacteria, fungi, and plants. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 90, p. 1609-1624, 2011.

[22] DRIDI, R. et al. Biosynthesized silver nanoparticles using Anagallis monelli: evaluation of antioxidant activity, antibacterial and antifungal effects. **Journal of Molecular Structure**, v. 1251, p. 1-10, 2022.

[23] ELDEEN, U. M. S. Effect of foliar spray with some natural plant extracts on earliness, productivity and quality of globe artichoke. **J. Product. & Dev.**, v. 20, n. 3, p. 307-324, 2015.

[24] FARIAS, E. A. O.; ARAUJO, T. D. S. Aplicações dos flavonóides em biotecnologia: propriedades terapêuticas e aplicações nanotecnológicas. **Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde**, 2014.

[25] FERREIRA, R. S. et al. Ora-Pro-Nobis (Pereskia aculeata) and its technological applications in foods: a review. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 3, p. e3961-e3961, 2024.

[26] FERREIRA, C. S. G. et al. **Influência da nanopartícula de ZnO sobre as propriedades da matriz biodegradável de PBAT para aplicação em embalagem de alimentos. *Concilium***, v. 23, n. 18, 2023.

[27] FILHO, S.; BACKX, B. P. Nanotecnologia e seus impactos na sociedade. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 40, p. 1-15, 2020.

[28] FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < http://floradobrasil.jbrj.gov.br/ >. Acesso em: 28 jun. 2023.

[29] FRANCELIN, M. F. et al. Desenvolvimento e caracterização de snack de milho extrusado com adição de farinha de ora-pro-nóbis. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021.

[30] FRANCISCO, T. C. T. **Análise de hidrolisados proteicos de *Pereskia aculeata* Miller (Ora-Pro-Nóbis)**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de QUÍMICA, Universidade Estadual Paulista, 2018.

[31] FREZATO, P. et al. Ação de bioestimulantes e nutrientes via tratamento de sementes na germinação e desenvolvimento de plântulas de *Glycine Max* L. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 18674-18679, 2021.

[32] GARCIA, J. A. A. et al. Phytochemical profile and biological activities of 'Ora-pro-nobis' leaves (*Pereskia aculeata* Miller), an underexploited superfood from the Brazilian Atlantic Forest. **Food Chemistry,** v. 294, p. 302-308, 2019.

[33] HEEMANN, A. C. W. et al. Extração de polifenóis de erva-mate verde assistida por enzimas. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, 2019.

[34] HENRIQUE, A. D. S.; LOPES, G. C. Biodiversidade e a indústria de cosméticos: o uso dos flavonoides contra o envelhecimento cutâneo. **Uningá Review**, v. 29, n. 2, 2017.

[35] HUPFFER, H. M.; PINTO, M. A. B.; QUEVEDO, D. M. Produtividade científica sobre nanotecnologia (2007-2019). **Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina**, v. 26, n. 2, p. 6, 2021.

[36] JALAB, J.; ABDELWAHED, W.; KITAZ, A.; AL-KAYALI, R. Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of Acacia cyanophylla and its antibacterial activity. Heliyon, v. 7, n. 9, 2021.

[37] JARDIM, F. C, et al. **Antioxidant evaluation of** *Pereskia aculeata* **Mill in natura, shade-dried, and sun-dried. *Brazilian Journal of Development***, Curitiba, v. 7, n. 9, p. 89906-89925, 2021.

[38] KANINGINI, A. G. Et al. Metal nanoparticles in agriculture: a review of possible use. **Coatings**, Basel, v. 12, n. 10, p. 1586, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/coatings12101586.

[39] KINUPP, V. F.; BARROS, I. B. I. Teores de proteína e minerais de espécies nativas, potenciais hortaliças e frutas, **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 4, n. 28, p. 846-857, 2008.

[40] KORKMAZ, N. et al. Eco-friendly biogenic silver nanoparticles: synthesis, characterization and biological applications. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13762-024-05860-w.

[41] MACIEL, V. B. V. et al. Ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller): a potential alternative for iron supplementation and phytochemical compounds. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 24, 2021.

[42] MACEDO, M.C.C. et al. Elaboration and Characterization of Pereskia aculeate Miller Extracts Obtained from Multiple Ultrasound-Assisted Extraction Conditions. **Metabólitos**, v. 13, n. 691, 2023.

[43] MOHAMMED, A. B. A. et al. Antioxidant and antibacterial activities of silver nanoparticles biosynthesized by Moringa Oleifera through response surface methodology. Journal of Nanomaterials, v. 2022, p. 1-15, 2022.

[44] MARQUES, L. C. Preparação de extratos vegetais. Jornal Brasileiro de Fitomedicina, v. 3, n. 2, p. 71-74, 2005.

[45] MENDES, J. E. Estudo in vitro da atividade aintifúngica de nanopartículas de prata em fungos de armazenamento de soja (Glycine max). 157 f. Tese de doutorado em Biotecnologia - Universidade Federal de São Carlos, 2015.

[46] MORAES, T. V. et al. Potencial antioxidante da espécie *Pereskia aculeata* Miller: uma análise bibliométrica. **Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research – BJSCR**, v.29, n.1, p. 79-85, 2019.

[47] NASEER, M. et al. Facile green synthesis of copper oxide nanoparticles for the eradication of multidrug resistant Klebsiella pneumonia and Helicobacter pylori biofilms. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 159, p. 105201, 2021.

[48] NYABOLA, A.O. et al. Formation of Silver Nanoparticles via *Aspilia pluriseta* Extracts Their Antimicrobial and Catalytic Activity. **J Inorg Organomet Polym**, p. 3493–3501 (2020).

[49] OLIVEIRA, L. F. Eficiência dos métodos de extração para obtenção de lactonas sesquiterpênicas: uma revisão sistemática. 65 f. Monografia de graduação (Bacharel em Engenharia Química) - Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, Feira de Santana, 2020.

[50] OLIVEIRA, G. Z. S. Síntese verde de nanopartículas de prata utilizando extrato aquoso e metabólito secundário (quercetina) das folhas de Pterodon emarginatus (sucupira branca) direcionadas para aplicações biomédicas e agrícolas. 220 f. Tese de doutorado (Nanociência e nanobiotecnologia) – Universidade de Brasília, 2018.

[51] OSELUSI, S. O. et al. Phytofabrication of silver nanoparticles using *Ehretia rigida* leaf aqueous extract, their characterization, antioxidant and antimicrobial activities. Materials Today Sustainability, v. 29, p. 101059, 2025.

[52] PASSOS, F. R. **Extração e processamento de folhas de *Pereskia aculeata* Miller empregando tecnologia verde**. 2022. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia química) – Campus Toledo, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo-PR, 2022.

[53] PELEGRINO, M. T. et al. Effects of copper oxide nanoparticles on growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings and possible implications of nitric oxide in their antioxidative defense. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 1-14, 2020.

[54] PINTO, N. C. et al. *Pereskia aculeata* Miller leaves present in vivo topical antiinflammatory activity in models of acute and chronic dermatitis. **Journal of Ethnopharmacology**, 2015.

[55] PIRES, N. M.; OLIVEIRA, V. R. Alelopatia. In: OLIVEIRA, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. Biologia e manejo de plantas daninhas. Curitiba: Omnipax, 2011. p. 95-123.

[56] PIVA, S. F. et al. Mucilage of *Pereskia aculeata* Miller as cryoprotectant of frozen strawberries: Preservation of bioactive compounds and microstructure. Journal of Food Process Engineering, v. 48, n. 1, e70027, jan. 2025. DOI: 10.1111/jfpe.70027.

[57] POCAI, A. V. et al. **Produção de bebida fermentada enriquecida com ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*).** Produtos Lácteos: Desenvolvimento & Tecnologia, 2020. Disponível em: https://www.meridapublishers.com/l3lacteos/l3capitulo4.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.

[58] PLANO DE AÇÃO NACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DAS CACTÁCEAS. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Icmbio, 2011. Disponível em <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-cactaceas/1-ciclo/pan-cactaceas-livro.pdf> Acesso em 28 jun. 2023.

[59] PRADO, H. A. P. S.; AUGUSTINHO, B. F.; PINTO, E.G. produtos enriquecidos com ora-pro-nóbis: revisão de literatura. In: OLIVIERA, K. A. R. et al. **Nutrição nos ciclos da vida - Pesquisas e avanços**. Rio Grande do Norte: Agron Food Academy, 2022.

[60] PROGRAMA NACIONAL DE BIOINSUMOS. Brasil: Ministério da agricultura e pecuária, 2020, não paginado. Disponivel em<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos> Acesso em 24 fev. 2024.

[61] QUEIROZ, C. R. A et al. Ora-pro-nóbis em uso alimentar humano: percepção sensorial. **Revista Verde**, v. 10, n. 3, p. 01-05, 2015.

[62] REHMAN, H. U. et al. Moringa leaf extract improves wheat growth and productivity by affecting senescence and source-sink relationship. **Int. J. Agric. Biol.**, v. 19, n.3, p. 479-484, 2017.

[63] ROSA, S. M.; SOUZA, L. A. Morfo-anatomia do fruto (hipanto, pericarpo e semente) e anatomia do fruto (hipanto, pericarpo e semente) em desenvolvimento de Pereskia aculeata Miller (Cactaceae), **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 415-428, 2003.

[64] RODRIGUES, L. C. Obtenção de tintura de folha de maracujá (Passiflora edulis Sims) com extração por líquido pressurizado: estudo da cinética de extração, aumento de escala e análise econômica. Dissertação de mestrado (Mestre em engenharia de alimentos) - Universidade de São Paulo, 2021.

[65] RUPPELT, B. M. et al. **Plantas medicinais utilizadas na região oeste do Paraná**. Curitiba: UFPR, 2015.

[66] SANFELICE, R. C., PAVINATTO, A., CORREA, D., & CORREA, D. S. Introdução à nanotecnologia. In: NANOTECNOLOGIA aplicada a polímeros. São Paulo: Blucher, cap. 1, 2022.

[67] SILVA, B. M. Avaliação da composição e do rendimento global dos extratos vegetais do orapro-nobis (*Pereskia aculeata* Mill.) oriundos de diferentes métodos de extração. 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

[68] SILVA, A. F. et al. Métodos de controle de plantas daninhas. In: OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. (Org.). **Controle de plantas daninhas: métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia**. Brasília: Embrapa, 2018. p. 11-33.

[69] SANTOS, F. P. A alelopatia em ecossistemas agrícolas. 2021. 18 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Horticultura) – Instituto Federal Goiano, Campos Cristalina, 2021.

[70] SILVEIRA, M. G. Ensaio nutricional de Pereskia spp.: Hortaliça não convencional. 2016. 174f. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

[71] SOARES, N. P. et al. Técnicas de prospecção fitoquímica e sua importância para o estudo de biomoléculas derivadas de plantas. **Enciclopédia biosfera**, v.13, n.24, p.991-1010, 2016.

[72] SOARES, L. C.; CASTRO, A. B.; MARTINS, M. V. Potencial antioxidante e valor nutricional das folhas da ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller): um estudo de revisão. **Brazilian Journal of Development**, v.8, n.1, p. 6649-6659, 2022.

[73] SOUSA, A. P. et al. Aplicação de ultrassom de sonda na obtenção de compostos bioativos derivados de matriz vegetal. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)**, v. 7, n. 3, 2022.

[74] SOUSA, R. R; GASPAROTI, P. S.; PAULA, J. A. M. Obtenção de extratos de plantas medicinais: uma revisão de escopo dos métodos extrativos modernos em comparação ao método clássico por soxhlet. **Revista Movimenta**, v.15, n.1, p. 1-14, 2022.

[75] **SOUZA, L. F. et al. Pereskia aculeata Muller (Cactaceae) Leaves: Chemical Composition and Biological Activities. Int J of Mol Sci, 2016.**

[76] SOUZA, A. G.; SOUZA, E. S.; OLIVEIRA, E. R. Óleo de farelo de arroz: características, métodos de extração e aplicações na indústria. 45 f. Trabalho de Graduação (Tecnólogo em processos químicos) - Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2022.

[77] SUSANTI, Deny et al. Natural products-based metallic nanoparticles as antimicrobial agents. **Frontiers in Pharmacology**, v. 13, p. 895616, 2022.

[78] SKŁODOWSKI, Karol et al. Metallic nanosystems in the development of antimicrobial strategies with high antimicrobial activity and high biocompatibility. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, p. 2104, 2023.

[79] TAKEITI, C. Y. et al. Nutritive vegetable (*Pereskia aculeata* Mill). **Internacional Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 60, n. 1, p. 1-13, 2009.

[80] TORRES, T. M. S. et al. Neuroprotective potential of extracts from leaves of ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata*) recovered by clean compressed fluids. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 179, p. 105390, 2021.

[81] TSUKUI, A.; REZENDE, C. M. Extração assistida por micro-ondas e química verde. **Revista virtual de química**, v. 6, n. 6, p. 1713-1725, 2014.

[82] ZEM, L. M. et al. Análise nutricional de farinha de folhas e caules de *Pereskia aculeata Mill.* (*Cactaceae*). **Natureza Online**, v. 17, n. 1, p. 041-050, 2019.

Capítulo 3

Dermocosmético com extrato de ora-pro-nóbis para aplicações em medicina regenerativa

Joacir João Neto Piana[1]
Mônica Lady Fiorese[2]
Keiti Lopes Maestre[3]
Carina Contini Triques de Almeida[4]
Larissa Echeverria[5]
Gabrielle Caroline Peiter[6]

Resumo: A ORA-PRO-NÓBIS (*Pereskia aculeata* Miller) (OPN) é uma planta alimentícia não convencional destacada por seu alto teor de proteínas e suas bioatividades, incluindo propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas. Devido a essas características, a planta é promissora na produção de dermocosméticos para medicina regenerativa, pois atende as atuais demandas de mercado, os ingredientes naturais e funcionais. Visando a extração destes compostos, por métodos de extração não convencionais, que apresentam elevada rentabilidade, extraem em curtos períodos e ainda preservam os compostos ativos, este estudo tem o objetivo de desenvolver um hidrogel enriquecido com extratos de ora-pro-nóbis, utilizando extração assistida por ultrassom (EAU) como um método rápido e sustentável. Um planejamento experimental 22 foi realizado para avaliar temperatura (30-50°C) e amplitude (40-60%) no processo de extração, com foco no rendimento e nas bioatividades, como atividade antioxidante (DPPH e ABTS), compostos fenólicos totais e teor de flavonoides. Os resultados indicaram que a melhor condição de extração foi obtida a 50°C e 60% de amplitude, resultando em um rendimento de 10,19% e nas seguintes quantificações: 158,23 µmol ET/g para a atividade antioxidante pelo método DPPH, 147,54 µmol TE/g pelo método ABTS, 132,30 mg EAG/g para compostos fenólicos e 26,95 mg EQ/g para flavonoides. O extrato obtido na melhor condição foi então, incorporado em diferentes concentrações na formulação do hidrogel, contendo 1%, 2,5% e 4% em massa do total. Os hidrogéis foram avaliados quanto ao pH e às bioatividades, e os resultados demonstraram estabilidade ao longo de 14 dias, com os biocompostos mantendo suas propriedades. Assim, os dermocosméticos desenvolvidos possuem grande potencial para aplicações na medicina regenerativa, beneficiando-se do enriquecimento com extratos de OPN que proporcionam elevada capacidade antioxidante e são ricos em compostos fenólicos. Estes resultados destacam o potencial dos hidrogéis como uma solução promissora para melhorar a qualidade de vida durante processos de regeneração celular.

Palavras-chave: Extração. Hidrogel. Antioxidantes. Compostos Fenólicos. Cicatrização.

[1] Laboratório de Engenharias sustentáveis (LES)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0009-0000-6919-1384
[2] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LES)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0001-5250-7178
[3] Laboratório de Engenharias sustentáveis (LES)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0002-5759-4597
[4] Laboratório de Engenharias sustentáveis (LES)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0002-0397-958X
[5] Laboratório de Engenharias sustentáveis (LES)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0002-2056-8985
6 Group of Polymers and Nanostructures – GPAN. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR https://orcid.org/0000-0001-7965-4434

1. INTRODUÇÃO

Dermocosméticos são considerados produtos cosméticos de uso cutâneo que oferecem benefícios, visando aliviar ou melhorar certas condições para a pele (Mourelle *et al.*, 2023), são produtos com sua composição enriquecida por substâncias farmacológicas com propriedades terapêuticas, atuando de maneira similar aos medicamentos dermatológicos de uso tópico (Nogueira, 2023). Diferentemente dos cosméticos comuns, que têm apenas finalidade estética e não possuem um objetivo específico. De acordo com a ANVISA (2023), os dermocosméticos, podem ser enquadrados como produtos de grau 2 pela RESOLUÇÃO - RDC Nº 752, DE 19 DE SETEMBRO DE 2022 visto que suas características, finalidades ou eficácia devem ser comprovadas cientificamente.

A medicina regenerativa é um campo da medicina que visa explorar o potencial de regeneração celular e a recuperação funcional dos tecidos, que pode ser potencializada por estímulos externos unidos a tecnologia (Hacker *et al.*, 2019). Dessa forma, o uso de dermocosméticos na regeneração celular tem ganhado destaque como uma abordagem inovadora para promover a saúde da pele e a recuperação de danos (Trovato *et al.*, 2024).

Esses produtos, que combinam princípios cosméticos e terapêuticos, visam estimular processos naturais de regeneração e reparo celular. Logo, há o aumento da demanda por produtos e insumos que auxiliem a medicina regenerativa surge a necessidade na pesquisa científica de impactar a sociedade e obter produtos de fácil acesso com potencial comprovado. Segundo matéria publicada pelo governo brasileiro em seu site no ano de 2023, com o título: Nova Estratégia Nacional para o Desenvolvimento do Complexo Econômico-Industrial da Saúde, é crucial a produção de insumos baratos e nacionais para garantir uma saúde pública de qualidade.

Os dermocosméticos fazem uso de ingredientes ativos a fim de estimular a proliferação celular como é o caso de princípios ativos antioxidantes. Para contemplar essa necessidade, empregou-se a *Pereskia aculleata* Miller conhecida como ora-pro-nóbis (OPN) uma planta cactácea, que apresenta alto teor de proteínas e minerais (Francelin, 2021). Assim como outras plantas não convencionais a OPN é utilizada popularmente na medicina tradicional (Hao, 2019), isso se dá devido as bioatividades presentes na planta, como antioxidantes e compostos fenólicos (Maciel *et al.*, 2021). Essas substâncias bioativas podem ser obtidas de forma concentrada por processos de extração, sendo uma etapa fundamental na aquisição de insumos para produzir um dermocosmético.

A extração assistida por ultrassom (EAU) é um método viável para a obtenção desses compostos bioativos. Seu uso se mostra mais eficiente frente a outros métodos convencionais (como hidro destilação, *soxhlet,* maceração) devido ao menor tempo necessário de extração para obter altos rendimentos (Anaya-Esparza *et al.*, 2023). A associação de solventes verdes como o etanol a técnicas não convencionas como a EAU surge como um meio sustentável de se obter compostos bioativos concentrados de plantas (Tzanova *et al.*, 2024).

Cruz *et al.* (2021) por meio de extração convencional de folhas de OPN, utilizando apenas agitação constante, em temperatura de 45°C por 30 min obtiveram como principais biotividades compostos antioxidantes e fenólicos. Além disso, retrataram a existência de atividade anti-hemolítica que é a à capacidade de uma substância de prevenir ou reduzir a hemólise, que é a destruição das células vermelhas do sangue (eritrócitos) e a liberação da hemoglobina no plasma.

A revisão da literatura e a análise de patentes revelaram que ainda não foram explorados, por meio de pesquisas ou inovações patenteadas, o potencial dos extratos e dos óleos naturais obtidos de OPN utilizando a técnica sustentável de EAU em dermocosméticos para tratamento de feridas e para os cuidados com a pele.

Assim, o objetivo desse trabalho foi produzir um dermocosmético com incorporação de extrato bioativo de *Pereskia aculeata* Miller (OPN), obtido de forma sustentável pela técnica de EAU. Para isso, utilizou-se um planejamento experimental do tipo 2^2 com três repetições no ponto central. Além disso, também se avaliou as bioatividades tanto dos extratos quanto dos dermocosméticos do tipo hidrogel.

2. METODOLOGIA

2.1. MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima utilizada foram as folhas de OPN, coletadas em residência particular na cidade de Toledo (24° 42’ 49’’ S latitude e 53° 44’ 35’’ W longitude) – Pr. A coleta foi realizada sempre em período matutino e sem incidência solar sobre elas conforme citado por Rodrigues (2004). Após a coleta, as folhas foram lavadas em água corrente com o intuito de remover as sujidades e os materiais orgânicos. Realizou-se a secagem das folhas em estufa com circulação de ar (Nova *Instruments*, modelo NI 1514) a 55°C para realização das determinações analíticas da composição centesimal. As folhas foram trituradas em um processador industrial (Hamilton Beach), realizou-se a separação granulométrica utilizando peneira de corte de 32 mesh, a farinha obtida (menor que 32 *mesh*) foi separada e estocada em freezer (-5ºC) até o momento da utilização.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A caracterização das folhas de OPN foi obtida pela análise da composição centesimal e composição química elementar.

A composição centesimal das folhas foi determinada de acordo com a metodologia oficial da *Association of Official Agricultural Chemists* – AOAC (2005), para a determinação da umidade (método 925.09), cinzas (método 923.03) e lipídios (método 920.85) (Horwitz e Latimer, 2005). Para o teor de proteína utilizou-se o método de Kjeldahl (Instituto Adolfo Lutz, 2008). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados expressos em base seca.

A concentração de elementos presentes nas folhas de OPN foi determinada pela técnica analítica de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF), utilizando o equipamento Bruker, Modelo: S2 PICOFOX, a partir de uma fonte de molibdênio incidindo raios X sobre a amostra com energia de 20 keV durante 1000 s, seguindo a metodologia proposta por Espinoza-Quiñones et al. (2015). As determinações foram realizadas em triplicata.

2.2.1. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE

O teor de umidade presente nas folhas de OPN foi quantificado por meio da pesagem de 20 g de amostra, as quais foram acometidas em placas de Petri previamente secas em estufa a 105 °C e pesadas. Posteriormente, as amostras e as placas foram acondicionadas em estufa de secagem durante 72 h à 55 ºC, sendo então retiradas e

resfriadas em dessecador. Por fim, o conjunto (amostra + placa) foi pesado. A umidade foi calculada pela diferença entre o peso final e inicial da amostra.

2.2.2. DETERMINAÇÃO DE PROTEÍNA TOTAL

A fim de determinar o teor de proteína total, pesou-se 0,1 g de amostra, previamente seca e triturada em tubo Kjehdal, adicionou-se 5 mL da solução digestora nas amostras. Os tubos foram acondicionados no bloco digestor a 50ºC, a qual foi aumentada a cada 30 min em 50 ºC até 450ºC.

Após a digestão, esperou-se esfriar e adicionou-se 15 mL de água destilada. Colocou-se 10 mL da solução receptora (ácido bórico) em um erlenmeyer de 125 mL. Acoplou-se o tubo de ensaio com a amostra devidamente digerida e diluída ao destilador de nitrogênio (Tecnal TE-0364), adicionou-se 20 mL de hidróxido de sódio 18 N no aparelho, fez-se a destilação até que o volume final fosse de 75 mL e finalmente, titulou-se a solução obtida com ácido sulfúrico 0,02 M.

2.2.3. DETERMINAÇÃO DE CINZAS

Pesou-se 2 g amostra em um cadinho previamente seco a 105 ºC por 8 h, para determinação do conteúdo de matéria mineral, o conjunto foi para a mufla a 550 ºC e este permaneceu até queima total da matéria orgânica (aproximadamente 4 h). Decorrido esse período, o conjunto permaneceu em dessecador até resfriar, e então pesado em balança analítica.

2.2.4. DETERMINAÇÃO DE LIPÍDEOS

Cerca de 3g de folha de OPN foi pesada em seguida, acondicionada em papel filtro qualitativo. O sistema foi formado por reboiler acoplado a um sistema do tipo goldfish (Tecnal TE-044-5/50). Incorporou-se 100 mL de éter de petróleo no reboiler, a amostra foi então submersa no solvente por 15 min a 75°C e após este tempo, suspendida e o solvente então pingou sob a amostra por 1 h e 30 min a 90°C. Seguidamente, o solvente foi recuperado e o conteúdo do reboiler foi para estufa de circulação para completa evaporação de resíduos de solvente. Após esse período, o conjunto reboiler-lipídeo foi resfriado em dessecador e então pesado para determinação da massa de lipídeos.

2.3. EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM (EAU)

A EAU foi realizada em ultrassom de ponteira de titânio com 13 mm de diâmetro com potência de 750 W e frequência de 20 kHz (SONICS; VIBRA-CELL: VCX 750) acoplado a um banho termostático (QUIMIS; Q214M2) para controle de temperatura. Os ensaios foram realizados com base em um planejamento experimental do tipo 2^2 com três repetições no ponto central, totalizando 7 experimentos. Os níveis avaliados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Condições codificadas utilizadas no planejamento experimental do tipo 2^2 para avaliar a influência de temperatura e amplitude

Variável	-1	0	1
Temperatura (°C)	30	40	50
Amplitude (%)	40	50	60

Fonte: Autor (2024).

As duas variáveis estudadas foram temperatura (30ºC – 50ºC), e amplitude (40% - 60%) para extrações de 5 min. Nos ensaios empregaram 40 mL do solvente etanol absoluto em 70% para todas as extrações. A massa das folhas de OPN (base seca) foi 2g. Os níveis das variáveis, o tempo, o solvente e a massa foram definidas baseados em estudos e pela expertise do Grupo de Pesquisa em Engenharias Sustentáveis (GES).

Ao final das EAU, os extratos foram filtrados com auxílio de uma bomba de vácuo e o solvente foi removido em estufa de circulação a 50°C. Os extratos foram armazenados sob refrigeração (-5°C) para posterior avaliação dos compostos bioativos. Os rendimentos foram calculados pela relação entre as massas antes e após as extrações das folhas de OPN (base seca).

Os resultados de rendimento obtidos a partir do planejamento experimental do tipo 2^2 com três repetições no ponto central foram avaliados utilizando o software Statistica 7.0, por meio do diagrama de Pareto, superfície de resposta e da análise de variância (ANOVA). A confiabilidade utilizada foi de 95%.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS EXTRATOS

Os extratos foram avaliados em termos de atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS, compostos fenólicos totais e flavonoides.

A atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS foi avaliada com base na metodologia de Li *et al.* (2021) com modificações, utilizou-se uma curva padrão com Trolox (Sigma Aldrich) variando de 200 µmol/L a 11,71 µmol/L, os extratos foram diluídos a uma concentração de 0,5 mg/mL em etanol, 100 µL das amostras e da curva foram adicionadas em microplaca, adicionou-se 100 µL de DPPH (Sigma Aldrich) a uma concentração de 0,12 mg/mL e após 30 minutos realizou-se a leitura em 530 nm. Para a metodologia ABTS utilizou-se a mesma curva e concentração de extratos, após adicionar o mesmo volume (100 µL) em microplaca, 100 µL do radical ABTS diluído (preparado pela mistura de ABTS (Sigma Aldrich) e persulfato de potássio e diluído em etanol até obter uma absorbância de 0,700±50), foram adicionados e após 10 min realizou-se a leitura a 750 nm. Os compostos fenólicos totais foram mensurados conforme a metodologia de Bobo-Garcia *et al.* (2015) com modificações, preparou-se uma curva padrão de ácido gálico variando de 200 g/mL a 11,71 g/mL, os extratos foram diluídos também em etanol a uma concentração de 0,5 mg/mL, adicionou-se 20 µL da curva e das amostras em microplaca, 100 µL de Folin-Ciocauteau (Êxodo cientifica), diluído a uma proporção 1:4 em água v/v, foi adicionado e a microplaca ficou em repouso por 4 min ao abrigo da luz, após este período adicionou-se 75 µL da solução de carbonato de cálcio (Êxodo científica) a uma concentração de 100 g/L, após 2 h realizou-se a leitura da absorbância a 750 nm.

Ambas as análises foram realizadas em leitora de microplacas (ELISA; KASUAKI: DR-200BS-NM-BI).

O teor de flavonoides foi obtido por meio da metodologia de Boroski *et al.* (2015) com modificações, preparou-se uma curva padrão de quercetina variando de 0 a 200 mg/L, os extratos foram diluídos em metanol a uma concentração de 0,5 mg/mL, adicionou-se cloreto de alumínio 5% v/v e após 30 min de reação realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro UV-Vis (Bel Engineering; UV – M51) a 425 nm.

O rendimento foi calculado utilizando a relação entre a massa de extrato obtida para a massa de amostra utilizada.

2.5. PRODUÇÃO DO DERMOCOSMÉTICO

O dermocosmético aqui desenvolvido é um hidrogel, realizado com base na metodologia descrita por Saracini *et al.* (2023) com modificações. Para um volume total de 25 mL, utilizou-se 1% de carbopol 940 (QuimisulSC) e 1% de glicerina bidestilada (Quimidrol), após a incorporação do extrato de OPN sob agitação magnética, conforme descrito pela Tabela 2, trietilamina (Sigma Aldrich) foi adicionada lentamente até se observar a formação do gel analisada pelo seu aspecto viscoso. Para o controle realizou-se o mesmo procedimento, sem a incorporação de extrato (ensaios C1 e C2). Todos os dermocosméticos foram produzidos em duplicata visando avaliar se houve reprodutibilidade entre os hidrogéis produzidos. Após o término do processo, os produtos obtidos foram armazenados sob refrigeração para posterior análise.

Tabela 2 Proporção percentual dos extratos de OPN e suas massas para o desenvolvimento do gel a base d'água (25g de água)

Princípio ativo	Ensaio	Proporção (p/p)	Massa correspondente (g)
Extrato OPN	1 e 2	1%	0,250
	3 e 4	2,5%	0,625
	5 e 6	4%	1,000

Fonte: Autor (2024).

2.6. CARACTERIZAÇÃO DO DERMOCOSMÉTICO

O dermocosmético foi avaliado ao longo de 14 dias, com testes realizados em intervalos de 7 dias, contados a partir do dia de produção. O pH foi medido utilizando fita universal de pH (COPAR). As bioatividades foram determinadas utilizando a mesma metodologia aplicada aos extratos, avaliando-se a atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS, bem como os compostos fenólicos totais. Para as análises, os hidrogéis foram diluídos em concentrações de 100, 40 e 25 mg/mL, respectivamente. No caso dos flavonoides, as amostras foram diluídas nas concentrações de 50, 20 e 12,5 mg/mL.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Para avaliar o potencial das folhas de OPN na extração de seus compostos bioativos, foi realizada uma caracterização centesimal e elementar da matéria-prima, levando em consideração sua composição. Os resultados dessas análises são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 Composição centesimal das folhas de ora-pro-nóbis expressa em termos de base seca e base úmida

Parâmetro (g/100g)	Base úmida	Base Seca
Umidade	87,41±0,71	-
Proteína	2,84±0,02	19,49±0,13
Cinzas	0,34±0,01	2,31±0,04
Lipídios	2,94±0,01	20,15±0,08

Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 Composição mineral das folhas de ora-pro-nóbis expressa em termos de base seca

Minerais	Resultados µg/100g
Potássio	251184,32
Cálcio	67216,04
Enxofre	21941,39
Fósforo	10160,71
Manganês	1569,66
Ferro	602,90

Fonte: Autor (2024).

Através da caracterização das folhas de OPN (Tabelas 3 e 4), nota-se que a composição centesimal da planta, está coerente com a literatura, pois segundo estudos de Barreira *et al.* (2021) ao investigaram o valor nutricional da folha de OPN, obtiveram os seguintes valores, para umidade 88,86 – 93,34, proteína 1,20 – 1,34, cinzas 0,95 – 0,97 e lipídeos 1,44 – 1,46, em base úmida em termos de porcentagem. Da mesma forma, Silva *et al.* (2023) em trabalho de revisão da literatura, apresentaram faixas de concentração dos diferentes parâmetros analisados na composição das folhas, para umidade 83,3 – 91,1; para proteína 14,3 – 29,0; para cinzas 10,8 – 16,1 e para lipídeos 4,1 – 16,3, os valores se encontram em termos de base seca (exceto umidade) em porcentagem. Pode-se analisar que apesar das diferenciações em relação aos teores de cinzas e lipídeos os valores obtidos neste estudo se encontram coerentes para a composição das folhas de OPN.

Em relação a composição mineral (Tabela 4), percebe-se seu potencial de utilização na obtenção de extratos para uso em dermocosméticos devidos aos minerais presentes nas folhas de OPN. Barreira *et al.* (2021) em suas análises da composição

nutricional e mineral da folha de OPN, detectaram a presença de carotenóides (3,15 mg/100 g), vitamina E (438,68 µg/100 g), e dos macronutrientes como cálcio (427,08 mg/100 g), magnésio (88,84 mg/100 g), manganês (3,46 mg/100 g), ferro (13,89 mg/100 g) e potássio (689,41 mg/100 g). Souza *et al.* (2020) obteve para nitrogênio, fósforo, magnésio, enxofre e zinco o conteúdo de 36,3 mg/g, 5,6 mg/g, 7,1 mg/g, 2,4 mg/g e 46,40 mg/g respectivamente, nas folhas de OPN. Além disso, Haftek *et al.* (2023), destacaram a importância dos inorgânicos na interação com a pele, minerais como zinco, cobre e manganês regulam de maneira diferenciada a expressão das subunidades de integrina facilitando a cicatrização de feridas epiteliais.

A variação nos resultados, pode ser justificada em razão das diferenças na composição das plantas, as quais podem ser atribuídas ao estágio de crescimento em que cada uma se encontra. Logo, plantas em diferentes idades ou fases de crescimento exibem composições nutricionais distintas (University of Georgia, 2024). Outro ponto relevante, está relacionado ao período em que a planta é coletada, que pode interferir no perfil físico-químico e no perfil dos compostos bioativos que compõem a planta (Souza *et al.*, 2022).

3.2. EXTRAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS

Os resultados para o rendimento (%) das extrações de compostos bioativos encontram-se apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Condições utilizadas em planejamento experimental do tipo 22 para avaliar a influência da temperatura e amplitude para a EAU das folhas de OPN e rendimentos obtidos

Ensaio	Temperatura (°C)	Amplitude (%)	Rendimento (%)
1	30	40	8,11
2	50	40	9,76
3	30	60	8,03
4	50	60	10,19
PC	40	50	9,26±0,04

Fonte: Autor (2024).

Conforme a Tabela 5, o maior rendimento alcançado (10,19%) foi obtido no ensaio realizado com a temperatura máxima de 50°C e amplitude de 60%.

Carnevalli *et al.* (2023) em processo de extração de folhas de OPN com diferentes solventes (diclorometano, etanol, metanol, acetato de etila, acetonitrila, hexano e clorofórmio), utilizaram 20 mL para 1 g e realizaram o procedimento em banho ultrassônico durante 40 min a uma temperatura de 40 °C. Os autores alcançaram um rendimento de 7,34%, demonstrando que, mesmo com um tempo prolongado de extração, os resultados obtidos não superaram os deste estudo.

Já Garcia *et al.* (2020) para um processo de extração em *shaker* a 130 rpm, utilizando como solvente de extração uma solução 70% etanol v/v a uma temperatura de 50°C por um período de 2 h obteve como resposta um rendimento de 32,1±4,5%. Vale-se ressaltar, que apesar do rendimento obtido neste estudo seja maior que o desta pesquisa, o uso de um longo tempo de extração por meio do calor gera maior gasto energético, e

ainda, podem degradar compostos bioativos contidos no extrato. Além de proporcionar bons resultados, a EAU requer curtos períodos de operação, economia em relação aos solventes e ainda, pode ser facilmente implementada em escala industrial

Para assegurar a solidez e a validade dos resultados e determinar a significância de cada fator, foi realizada uma avaliação estatística do planejamento experimental. A Tabela 6, apresenta a análise de variância (ANOVA) simplificada, onde a regressão é composta pelos termos temperatura, amplitude e interação, a Figura 1 mostra o Diagrama de Pareto e a Figura 2 demostras a Superfície de Resposta.

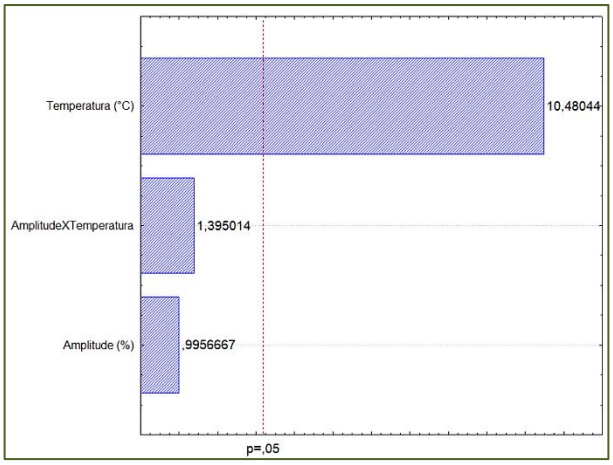
Tabela 6 Tabela ANOVA

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F_{calc}	F_{tab}
Regressão	3,724	3	1,241	37,592	9,28
Resíduos	0,099	3	0,033		
Falta de Ajuste	0,096	1	0,096	67,781	18,51
Erro puro	0,003	2	0,001		
Total	3,823	6			

SQ = Soma dos Quadrados; GL = Graus de Liberdade; QM = Quadrado Médio.

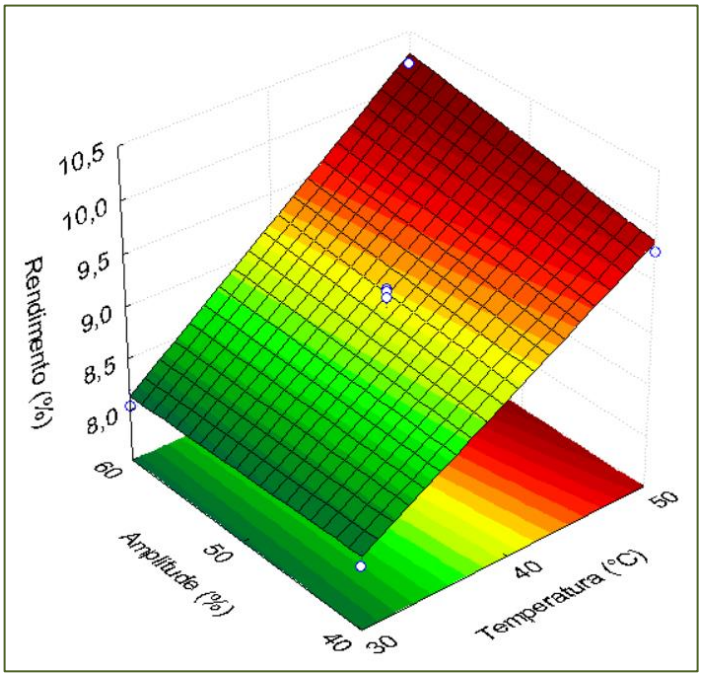
Fonte: Autor (2024).

Figura 1 Diagrama de Pareto.



Fonte: Autor (2024).

Figura 2 Avaliação de Superfície de Resposta em função dos parâmetros rendimento, amplitude e temperatura.



Fonte: Autor (2024).

Pelo diagrama de Pareto (Figura 1), pode-se concluir que as variáveis analisadas e sua interação apresentaram efeitos positivos, porém apenas a temperatura foi significativa no processo de extração, onde o seu aumento favorece o rendimento, tudo isto a um nível de 95% de confiabilidade.

A Figura 2, que ilustra a superfície de resposta do rendimento em função da temperatura e da amplitude, demonstra claramente os efeitos das variáveis analisadas. Observa-se um efeito positivo significativo da temperatura, o rendimento aumenta ao se elevar a temperatura do nível inferior (30°C) para o nível superior (50°C). Em relação à amplitude, seu efeito é praticamente constante, uma vez que a variação de 40% para 60% não resulta em um aumento significativo no rendimento, conforme indicado pela região verde na superfície de resposta.

Já pela Tabela 6, que apresenta a ANOVA, realizou-se o teste F, verificou-se que a regressão, composta pelos termos da temperatura, amplitude e interação (temperatura-amplitude), é significativa dado que o valor de F_{tab} é menor que $F_{calc.}$ Desta forma, aliado ao valor do coeficiente de correlação (R^2) de 0,974, o modelo obtido é representativo, representando 97,4% dos dados experimentais. Apesar de ser um modelo significativo, apresentou falta de ajuste pelo teste F obteve-se que $F_{calc}>F_{tab}$, confirmando a hipótese de falta de ajuste. Embora o modelo possa ser estatisticamente significativo, ele não captura bem todas as nuances dos dados, sugerindo a necessidade de um modelo mais complexo ou uma reavaliação dos fatores considerados.

A análise dos fatores temperatura e amplitude neste estudo se denotam importantes pois a temperatura, termodinamicamente, auxilia no processo de transferência de massa e na solubilidade dos compostos bioativos presentes na folha (Albarri e Şahin, 2021). Enquanto, a amplitude se refere a intensidade das ondas

ultrassônicas no processo de extração, que é responsável pelo fenômeno de cavitação, onde microbolhas implodem causando a ruptura da parede celular (Panda e Manickan 2019) liberando facilmente os compostos bioativos presentes na planta.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS EXTRATOS

Os resultados para as bioatividades analisadas, como antioxidantes (DPPH e ABTS), compostos fenólicos totais e flavonoides são apresentados na Tabela 5.

Os dados apresentados na Tabela 5 evidenciam que o extrato estudado exibe bioatividades notáveis, especialmente no que diz respeito ao seu potencial antioxidante, que foi mensurado utilizando os métodos DPPH e ABTS. Além disso, a análise revelou a presença significativa de compostos fenólicos e flavonoides, que são conhecidos por suas propriedades benéficas à saúde. Entre os diferentes ensaios realizados, o Ensaio 4 apresentou os resultados mais expressivos, com valores de 158,23 µmol ET/g para a atividade antioxidante pelo método DPPH, 147,54 µmol TE/g pelo método ABTS, 132,30 mg EAG/g para a concentração de compostos fenólicos e 26,95 mg EQ/g para o conteúdo de flavonoides. Os valores obtidos evidenciam a elevada eficácia do extrato, tanto em termos de propriedades antioxidantes quanto de compostos bioativos, justificando, assim, sua incorporação em hidrogéis.

Para um extrato hidroalcóolico com 70% de etanol v/v e extração em banho de ultrassom, Ciríaco *et al.* (2024) obtiveram uma concentração de 1,01 mg EAG/g para os compostos fenólicos totais, e 6,30 mg ET/g para a análise da captura do radical ABTS. Já Macedo *et al.* (2023) utilizando um banho ultrassônico em temperatura ambiente (20°C) tendo como solvente de extração uma mistura binária etanol-água 50% v/v em uma razão massa solvente 5g/50mL em 4 diferentes tempos, obtiveram para compostos fenólicos totais um intervalo de 2,07 a 2,60 mg EAG/g de extrato, já para a atividade antioxidante, pelo método DPPH a faixa obtida foi de 24,48 a 70,20 µmol ET/g de extrato enquanto para o ABTS obtiveram 6,38 a 10,24 µmol ET/g de extrato.

Os flavonoides são uma classe de compostos bioativos amplamente encontrados em plantas e são considerados como metabólitos secundários polifenólicos (Manzoor *et al.*, 2023). Em análise cromatográfica de extratos hidroalcóolicos obtidos em *shaker* em 130 rpm, utilizando uma mistura hidroalcóolica 70% em v/v para uma razão 1:20 massa solvente durante um período de 2 h em temperatura ambiente, Garcia *et al.* (2019) obtiveram uma concentração de 11,4 mgEAG/g de flavonoides, demonstrando que mesmo com o tempo elevado de extração, o valor obtido foi menor que o obtido neste estudo.

Considerando os valores da literatura para os processos de extração convencionais, a aplicação da EAU se mostra altamente relevante, dado que os resultados obtidos neste estudo foram superiores para todas as bioatividades analisadas. Esses dados indicam um potencial significativo dos extratos, destacando a eficácia da EAU em comparação com métodos tradicionais, visto que os compostos bioativos analisados são responsáveis por conferir características de interesse para o dermocosmético a ser produzido com intuito de auxiliar a recuperação celular. Nesse sentido, o teste de Tukey foi usado para identificar as diferenças significativas entre as médias dos grupos. Os resultados do teste de Tukey indicaram diferenças significativas entre os grupos. No entanto, o ensaio com maior rendimento esteve consistentemente no grupo com maior bioatividade em todos os potenciais analisados. Considerando o elevado rendimento e os

bons resultados de bioatividade, a condição processual correspondente ao ensaio 4 do planejamento experimental 2^2 (temperatura de 50ºC e amplitude de 60%) foi escolhida como a mais adequada para incorporação no dermocosmético.

Tabela 5 Avaliação do Potencial antioxidante (DPPH e ABTS), compostos fenólicos totais e flavonoides dos extratos de OPN obtidos

Ensaio	Potencial Antioxidante	
	DPPH (µmol ET/g de extrato)	ABTS (µmol ET/g de extrato)
1	152,77±7,57[a]	163,02±3,26[a]
2	149,32±2,37[a, b]	91,68±5,93[c]
3	140,69±5,91[b]	132,11±7,30b
4	158,23±3,00[a]	147,54±2,96[a, b]
5	149,92±3,28[a, b]	143,29±8,67[b]
6	158,67±2,54[a]	140,87±1,82[b]
7	158,50±0,87[a]	135,12±2,81[b]
Ensaio	Outros potenciais bioativos	
	Fenólicos (mg EAG/g de extrato)	Flavonoides (mg EQ/g de extrato)
1	105,01±7,98[b, c]	15,97±0,70[e]
2	95,07±7,45[c]	19,57±0,46[b, c]
3	117,88±2,70[a, b]	14,49±0,70[e]
4	132,30±4,14[a]	26,95±1,16[a]
5	124,89±6,72[a]	16,95±0,23[d, e]
6	128,60±8,84[a]	22,69±1,62[b, c]
7	129,77±7,46[a]	23,67±0,70[a, b]

Os dados são apresentados com média ± desvio padrão. ET = Equivalente Trolox; EAG = Equivalente Ácido Gálico; EQ = Equivalente Quercitina. Médias dentro da mesma coluna com letras diferentes são significativamente diferentes ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2024).

3.4. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO DERMOCOSMÉTICO

As diferentes concentrações de extrato (Tabela 2) influenciaram diretamente a quantidade de trietilamina necessária para alcançar a viscosidade desejada nos ensaios. Nos ensaios 1 e 2, foram adicionadas 9 gotas de trietilamina, enquanto nos ensaios 3 e 4, foram necessárias 17 gotas, já os ensaios 5 e 6, 20 gotas. Nos grupos controle, foram utilizadas apenas 2 gotas.

A produção dos hidrogéis indica que houve uma interação significativa entre o extrato vegetal de OPN e a formulação, exigindo volumes maiores de trietilamina à medida que a concentração de extrato aumentava. Para a formação adequada do gel no dermocosmético, apesar do aumento do volume utilizado, as maiores concentrações não adquiriram a consistência esperada nos ensaios 3, 4, 5 e 6. Em estudo realizado por Gavan *et al.* (2022) foi perceptível que ao utilizar maiores concentrações de extrato vegetal, a firmeza advinda de alta viscosidade foi alterada, ou seja, quanto mais concentrado menos viscoso permanecia o dermocosmético, demonstrando que menores concentrações seriam mais eficientes para se manter a característica viscosa do produto.

Os resultados obtidos para a análise de pH se encontram na Tabela 6, para cada intervalo de tempo.

A Tabela 6 mostra que o pH dos hidrogéis variou entre 4 e 5. Observou-se uma redução no pH do controle decorridos 7 dias de armazenamento.

A variável pH nos hidrogéis é importante devido a compatibilidade com a pele, garantia da estabilidade das substâncias bioativas na formulação, reatividade e interação para desenvolver a função do dermocosmético (Lukić *et al.,* 2021; Szabó *et al.,* 2023). Szabó *et al.,* (2023), elucidam que o pH da pele desempenha um papel crucial na manutenção da homeostase cutânea, influenciando diretamente a microbiota e a prevenção de distúrbios e doenças dermatológicas. Segundo o estudo de Lukić *et al.* (2021), produtos tópicos que mantêm o pH da pele dentro da faixa ácida de 4 a 6 são essenciais para promover a saúde da pele. Este intervalo favorece a diferenciação dos queratinócitos, a formação de lipídios epidérmicos e a função do envelope lipídico dos corneócitos, além de contribuir para a integridade da barreira cutânea e a preservação de uma microbiota saudável. Portanto, a escolha de produtos com pH adequado é fundamental para a eficácia em tratamentos dermatológicos na manutenção geral da saúde da pele e promoção da qualidade de vida

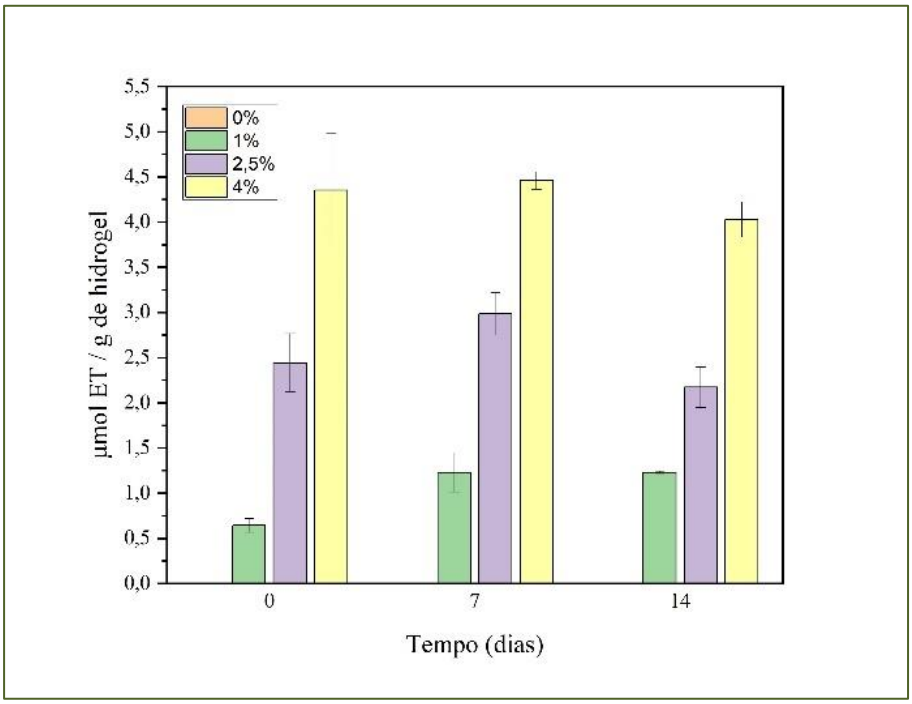
Tabela 6 Acompanhamento do pH durante o período avaliado de 14 dias em intervalo de 7 dias

Ensaio	pH		
	Dia 0	7 dias	14 dias
1	5 – 6	4 – 5	4 – 5
2	5 – 6	5 – 6	5 – 6
3	4 – 5	4 – 5	4 – 5
4	4 – 5	5 – 6	5 – 6
5	5 – 6	5 – 6	5 – 6
6	4 – 5	4 – 5	4 – 5
C	5 – 6	4 – 5	4 – 5
C	5 – 6	4 – 5	4 – 5

Fonte: Autor (2024).

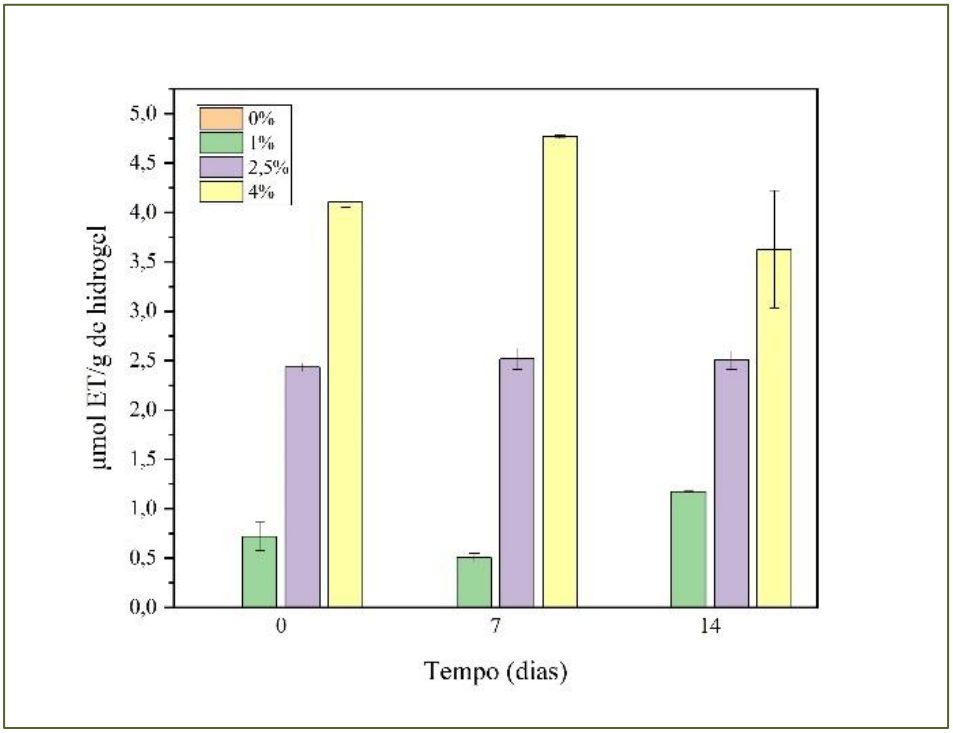
As substâncias bioativas também foram monitoradas ao longo do tempo nos hidrogéis, as Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam respectivamente, os resultados obtidos para as análises de DPPH, ABTS, fenólicos e flavonoides.

Figura 3 Atividade antioxidante dos dermocosméticos de extrato de OPN pelo método DPPH ao longo de 14 dias.



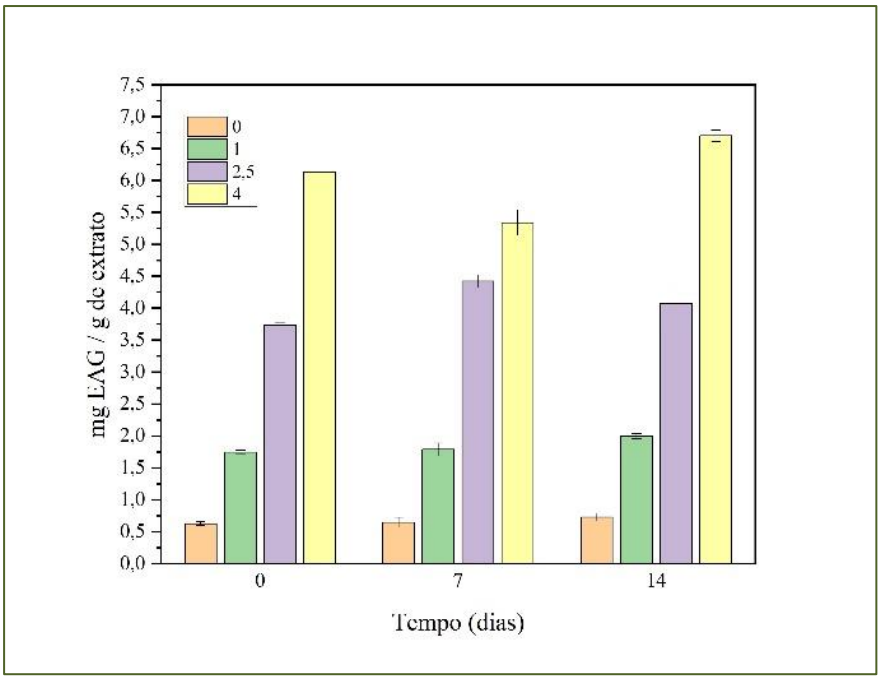
Fonte: Autor (2024).

Figura 4 Atividade antioxidante dos dermocosméticos de extrato de OPN pelo método ABTS ao longo de 14 dias.



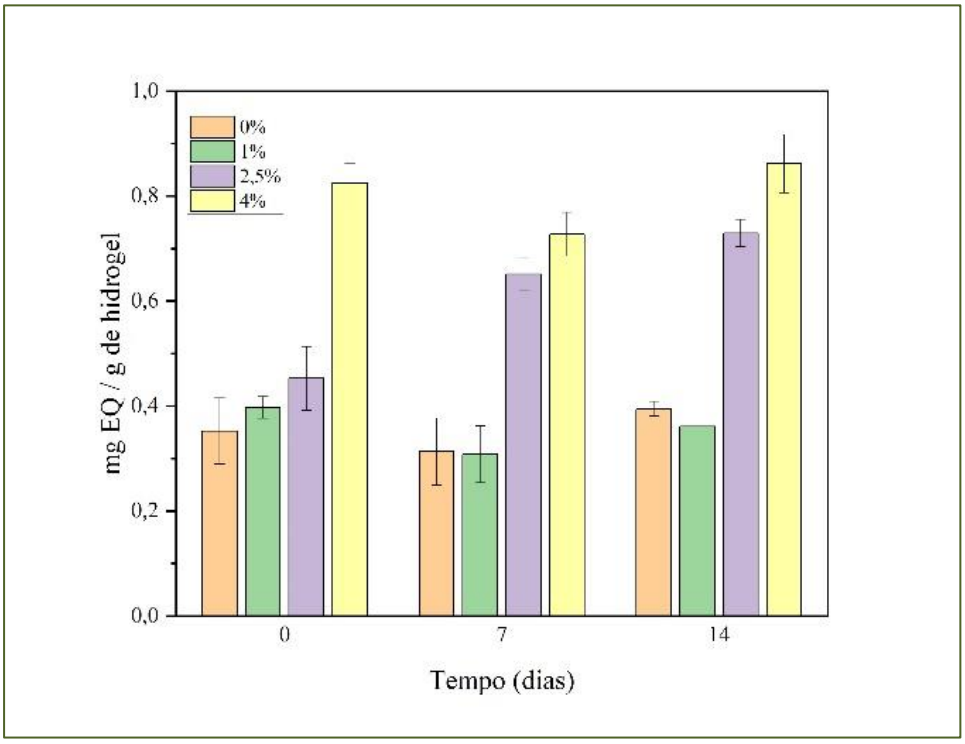
Fonte: Autor (2024).

Figura 5 Teor de compostos fenólicos totais nos dermocosméticos de extrato de OPN ao longo de 14 dias.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6 Teor de flavonoides nos dermocosméticos de extrato de OPN ao longo de 14 dias.



Fonte: Autor (2024).

Observou-se que as bioatividades dos hidrogéis permaneceram estáveis ao longo dos 14 dias de monitoramento, sugerindo que o tempo de armazenamento não comprometeu os potenciais antioxidantes do extrato incorporado nos hidrogéis. Além disso, verificou-se que o aumento da concentração de extrato no hidrogel resultou em um incremento significativo de sua atividade bioativa. Ambos os métodos utilizados confirmaram a eficácia antioxidante dos hidrogéis enriquecidos com extrato de OPN, reforçando seu potencial no desenvolvimento de dermocosméticos com propriedades antioxidantes. Em contraste, o controle não exibiu atividade antioxidante, corroborando que a adição dos extratos vegetais não apenas enriquece a formulação do hidrogel, mas também aumenta sua eficácia em aplicações cutâneas.

Os compostos antioxidantes desempenham um papel essencial na cicatrização de feridas e na manutenção da saúde da pele, atuando na redução do estresse oxidativo, aceleração do processo de cicatrização, modulação da inflamação e promoção da saúde celular. Hoang *et al.* (2021) enfatizaram a importância da inclusão de extratos antioxidantes em cosméticos, destacando sua capacidade de prevenir o estresse oxidativo na pele e de auxiliar em processos regenerativos, além de proteger contra a oxidação do próprio produto. Além disso, os antioxidantes presentes nos extratos vegetais, quando aplicados na pele, estimulam a atividade das enzimas antioxidantes endógenas e desempenham um papel crucial na fotoproteção cutânea (Michalak, 2023).

Diante do explanado, ressalta-se a relevância deste estudo, pois auxilia na medicina regenerativa de tecidos, compostos antioxidantes combatem os radicais livres e aceleram o processo de cicatrização, como demonstrado por Casado-Diaz *et al.* (2022), que realizaram testes *in vivo* com hidrogéis incorporados de extratos das folhas de *Olea europaea* com concentração de 1%, estes hidrogéis apresentaram respectivamente 1,62±0,03 e 1,35 ±0,06 µmol ET/g de hidrogel para os métodos DPPH e ABTS, valores significativamente inferiores aos obtidos neste estudo, demonstrando o potencial regenerativo do dermocosmético produzido.

Os compostos fenólicos e flavonoides são mostrados pelas Figuras 5 e 6, respectivamente. Nota-se um comportamento uniforme e homogêneo nas amostras, indicando que houve estabilidade dos compostos no tempo avaliado (14 dias), e, portanto, a não degradação destes bioativos. Um aspecto relevante foi a coloração observada nos controles durante a análise dos fenólicos e flavonoides, resultando numa quantificação destes compostos. Levando em conta a ausência de cadeias aromáticas nos reagentes utilizados na formulação do dermocosmético, é possível que reações entre o reagente Folin-Ciocalteu e agentes básicos, como a trietilamina, tenham contribuído para a formação dessa coloração durante a avaliação desses bioativos.

Os compostos fenólicos totais, incluindo os flavonoides, desempenham um papel fundamental nos processos de cicatrização, devido às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antibacterianas (Kaparekar; Anandasadagopan, 2022). Isso torna sua avaliação essencial neste estudo, especialmente considerando o potencial uso desses compostos na medicina regenerativa. Contudo, a revisão da literatura indica uma escassez de pesquisas que abordem a quantificação de compostos fenólicos totais em dermocosméticos à base de hidrogéis. Este estudo, portanto, ressalta a importância dessa análise, dado os benefícios potenciais dos compostos fenólicos para a regeneração da epiderme.

As diferenças observadas entre as réplicas, bem como os desvios entre as amostras analisadas em diferentes dias, podem estar relacionadas à falta de homogeneidade inicial.

Além disso, o tempo de contato entre o gel e o extrato vegetal pode ter influenciado esses resultados, permitindo uma difusão mais eficiente e, consequentemente, uma incorporação mais homogênea ao longo dos dias.

Com base na caracterização do hidrogel em termos de bioatividades e pH, pode-se concluir que foi obtido um dermocosmético com potenciais bioativos significativos. A adição de uma maior concentração de extrato vegetal resultou em um produto com níveis aumentados de compostos antioxidantes e fenólicos, conforme demonstrado nos ensaios 5 e 6, que utilizaram uma concentração de 4% de extrato de OPN. Embora a consistência do hidrogel tenha apresentado baixa viscosidade visualmente, o teor elevado de ativos bioativos reforça seu potencial para uso em tratamentos cutâneos. Desta forma, este trabalho consegue preencher a lacuna na literatura de um dermocosmético que auxilie em processos regenerativos, contribuindo veementemente para o avanço da ciência e o acesso da população a produtos eficazes e de qualidade.

4. CONCLUSÃO

A incorporação de extratos de *Pereskia aculeata* Miller em novos hidrogéis revelou um significativo potencial antioxidante e elevado teor de bioatividade, destacando-se como uma alternativa promissora para a cicatrização de feridas e aplicações na medicina regenerativa. O delineamento experimental indicou que a extração das substâncias bioativas da OPN nas condições ideais de temperatura (50°C) e amplitude (60%) proporcionou um rendimento adequado para a sua integração em hidrogéis. Os produtos formulados demonstraram que os extratos mantiveram suas propriedades bioativas, comprovando a eficácia da incorporação na formulação. Este estudo confirma o desenvolvimento de um dermocosmético do tipo hidrogel com extratos de OPN, oferecendo um produto acessível que contribui para a regeneração e tratamento dos tecidos epidérmicos. Os resultados obtidos ressaltam o potencial do produto desenvolvido para a medicina regenerativa, evidenciando sua capacidade de acelerar o processo de cicatrização e promover uma melhor qualidade de vida para os usuários.

REFERÊNCIAS

[1] ALBARRI, R.; ŞAHIN, S. Kinetics, thermodynamics, and mass transfer mechanism of the ultrasound-assisted extraction of bioactive molecules from *Moringa oleifera* leaves. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 7919-7926, 2021.

[2] ANAYA-ESPARZA, L. M. et al. Design of Experiments for Optimizing Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant-Based Sources. **Molecules**, v. 28, p. 7752, 2023.

[3] AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**, 2010.

[4] BARREIRA, T. F. et al. Nutrient content in ora-pro-nóbis (Pereskia aculeata Mill.): unconventional vegetable of the Brazilian Atlantic Forest. **Food Science and Technology,** v. 41, p.47–51, 2021.

[5] BOBO-GARCIA, G. et al. Intra-laboratory validation of microplate methods for total phenolic content and antioxidant activity on polyphenolic extracts, and comparison with conventional spectrophotometric methods. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, p. 204–209, 2015.

[6] BOROSKI, M. Antioxidantes: princípios e métodos analíticos. Curitiba: **Appris**, v. 141, 2015.

[7] BRASIL. Resolução - RDC nº 752, de 19 de setembro de 2022. *Diário Oficial da União*, Ministério da Saúde/Agência Nacional de Vigilância Sanitária/Diretoria Colegiada, Brasília, DF, 21 set. 2022. Seção 1, p. 177.

[8] CARNEVALLI, D.B. et al. Bioactive compounds profile of extracts from Pereskia aculeata Miller leaves prepared with different solvents by ultrasound-assisted extraction. **Contribuciones a las ciencias sociales**, v. 16(6), p.4696–4714, 2023.

[9] CIRÍACO, A. C. A.; MENDES, R. M.; CARVALHO, V. S. Antioxidant activity and bioactive compounds in ora-pro-nóbis flour (Pereskia aculeata Miller). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 26, p. e2022054, 2023.

[10] Citation: CASADO-DIAZ, A. et al. Evaluation of Antioxidant and Wound-Healing Properties of EHO-85, a Novel Multifunctional Amorphous Hydrogel Containing *Olea europaea* Leaf Extract. **Pharmaceutics**, v. 14, p. 349, 2022.

[11] CRUZ, T. M. et al. Extraction optimization of bioactive compounds from ora-pro-nobis (Pereskia aculeata Miller) leaves and their in vitro antioxidant and antihemolytic activities. **Food Chemistry**, v. 361, p.130078, 2021.

[12] ESPINOZA-QUIÑONES, F. R. et al. Analysis of Trace Elements in Groundwater Using ICP-OES and TXRF Techniques and Its Compliance with Brazilian Protection Standards. **Water Air Soil Pollut**, v. 226, n. 32, p. 1-12. 2015.

[13] FERREIRA NOGUEIRA, J. Dermocosméticos: origem, evolução e tendências tecnológicas. **Health and Society**, v. 3, n. 01, p. 241-261, 2023.

[14] FRANCELIN, M. F. et al. Development and characterization of extruded corn snack with addition of ora-pro-nobis flour. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e2910312850, 2021.

[15] GARCIA J. A. A. et al. Total phenolic content and antioxidant potential of 'ora-pro-nobis' leaves: an in vitro comparative study between pereskia aculeata miller and pereskia grandifolia haw, **International Journal of Development Research**, v. 10, n. 04, p. 35310-35314, 2020.

[16] GARCIA, J. A. A. et al. Phytochemical profile and biological activities of 'Ora-pro-nobis' leaves (Pereskia aculeata Miller), an underexploited superfood from the Brazilian Atlantic Forest. **Food Chemistry**, v. 294, p.302–308, 2019.

[17] GAVAN, A. et al. Development and Evaluation of Hydrogel Wound Dressings Loaded with Herbal Extracts. **Processes**, v. 10, p. 242, 2022.

[18] Governo Federal lança Nova Estratégia Nacional para o Desenvolvimento do Complexo Econômico-Industrial da Saúde. *Gov.br*, 29 set. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/09/governo-federal-lanca-nova-estrategia-nacional-para-o-desenvolvimento-do-complexo-economico-industrial-da-saude.Acesso em 03/08/2024

[19] HACKER, M. C.; KRIEGHOFF, J.; MIKOS A. G.; Synthetic Polymers. **Principles of Regenerative Medicine**, v. 3, p. 559, 2019.

[20] HAFTEK, M.; ABDAYEM, R.; GUYONNET-DEBERSAC, P. Skin Minerals: Key Roles of Inorganic Elements in Skin Physiological Functions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, p. 6267, 2022.

[21] HAO, D. C. Genomics and Evolution of Medicinal Plants. **Ranunculales Medicinal Plants**, p. 1–33, 2019.

[22] HOANG, H. T.; MOON, J.-Y.; LEE, Y.-C. Natural Antioxidants from Plant Extracts in Skincare Cosmetics: Recent Applications, Challenges Perspectives. **Cosmetics**, v. 8, p. 106, 2021.

[23] HORWITZ, W. & LATIMER, G. W. Official Methods of Analysis of AOAC International. **Maryland: Association of Official Analytical Chemistry International**, 2005.

[24] Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: **Instituto Adolfo Lutz**, 2008.

[25] KAPAREKAR, P. S.; ANANDASADAGOPAN, S. K. The Potential Role of Bioactive Plant-Based Polyphenolic Compounds and Their Delivery Systems - as a Promising Opportunity for a New Therapeutic Solution for Acute and Chronic Wound Healing. **Current Pharmacology Reports**, v. 8, p.321–338, 2022.

[26] LI, Z. et al. Phytochemicals, antioxidant capacity and cytoprotective effects of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) axis extracts on HepG2 cells. **Food Bioscience**, v. 41, p. 100933, 2021.

[27] LUKIC, M.; PANTELIC, I.; SAVIC, S. D. Towards Optimal pH of the Skin and Topical Formulations: From the Current State of the Art to Tailored Products. **Cosmetics**, v. 8, p. 69, 2021.

[28] MACEDO, M. C. C. et al. Elaboration and Characterization of *Pereskia aculeate* Miller Extracts Obtained from Multiple Ultrasound-Assisted Extraction Conditions. **Metabolites** 2023, 13, 691.

[29] MACIEL, V. B. V. et al. Ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller): a potential alternative for iron supplementation and phytochemical compounds**. Brazilian Journal of Food Technology**, v. 24, p. e2020180, 2021.

[30] MANZOOR, M. A. et al. Flavonoids: a review on biosynthesis and transportation mechanism in plants. **Functional & Integrative Genomics**, v.23, p.212, 2023.

[31] MICHALAK, M. Plant Extracts as Skin Care and Therapeutic Agents. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, p. 15444, 2023.

[32] MOURELLE, M. L.; GOMEZ, C. P.; LEGIDO, J. L. Hydrobiome of Thermal Waters: Potential Use in Dermocosmetics. **Cosmetics**, v. 10, p. 94, 2023.

[33] PANDA, D.; MANICKAM, S. Cavitation Technology—The Future of Greener Extraction Method: A Review on the Extraction of Natural Products and Process Intensification Mechanism and perspectives. **Applied Sciences**, v. 9, p.766. 2019.

[34] RODRIGUES, V. G. S. Cultivo, uso e manipulação de plantas medicinais. Porto Velho: **Embrapa Rondônia 2004**. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/916031. Acesso em 31 de julho de 2024

[35] SARACINI, J. et al. Borophosphate glasses as active agents for antimicrobial hydrogels. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 644, p.123323–123323, 2023.

[36] SILVA, N. F. N. et al. *Pereskia aculeata* Miller as a Novel Food Source: A Review. **Foods**, v. 12, p. 2092, 2023.

[37] SOUZA, A. H. et al. Influence of Harvest Time on the Chemical Profile of Pereskia aculeate Mill. Using Paper Spray Mass Spectrometry. **Molecules**, v. 27, p. 4276, 2022.

[38] SOUZA, M. R. M. et al. Protein Yield and Mineral Contents in Pereskia Aculeata Under High-Density Planting System. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e62365, 2020.

[39] SZABÓ, K. et al. Are the Cutaneous Microbiota a Guardian of the Skin's Physical Barrier? The Intricate Relationship between Skin Microbes and Barrier Integrity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, p. 15962, 2023.

[40] TROVATO, F. et al. Advancements in Regenerative Medicine for Aesthetic Dermatology: A Comprehensive Review and Future Trends. **Cosmetics,** v. 11, p. 49, 2024.

[41] TZANOVA, M.T. et al. Green Solvents for Extraction of Natural Food Colorants from Plants: Selectivity and Stability Issues. **Foods**, v. 13, p. 605, 2024.

[42] University of Georgia College of Agricultural & Environmental Sciences. Plant Analyses **Handbook Nutrient Content of Plants (2024).** Disponível em: https://aesl.ces.uga.edu/publications/plant/Nutrient.html. Acesso em 14 de agosto de 2024.

Capítulo 4

Potencial biotecnológico de árvores nativas Myrcia glomerata: compostos bioativos, extratos vegetais e nanotecnologia verde

Amanda Janaina Gonsatti Feitosa[1]
Luana de Souza[2]
Jéssica Rosset[3]
Mayara Maria de Souza[4]
Carina Contini Triques de Almeida[5]
Mônica Lady Fiorese[6]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[7]

Resumo: O presente capítulo apresenta uma revisão sobre os potenciais biotecnológicos de árvores nativas brasileiras, com destaque a espécie *Myrcia glomerata*, tendo foco nos compostos bioativos, extratos vegetais e nanotecnologia verde. Destaca-se a importância dos metabólitos secundário das plantas, com propriedades antimicrobianas, antioxidantes e alelopáticas. As características dos variados métodos de extração e a sustentabilidade da síntese verde de nanopartículas metálicas também são abordados com ênfase em suas aplicações em diversos setores. Esta revisão destaca a família Myrtaceae, amplamente conhecida por suas propriedades medicinais, com foco especial na espécie *Myrcia glomerata*, nativa do Brasil. Embora o gênero *Myrcia* apresente diversas atividades biológicas já descritas, a espécie *M. glomerata* ainda é pouco estudada, ressaltando a necessidade de investigações futuras para melhor compreender seu potencial biotecnológico e medicinal.

Palavras-chave: Atividades biológicas. Nanotecnologia verde. *Myrcia glomerata*.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-4902-0972
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-0851-2161
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-8348-0649
[4] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0000-0444-1442
[5] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo -PR https://orcid.org/0000-0002-0397-958X
[6] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0001-5250-7178
[7] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem se utilizado de produtos naturais desde as civilizações antigas, empregando-os para diversas finalidades. A busca por plantas e vegetais com propriedades medicinais, visando alívio e cura de doenças, pode ser considerada uma das primeiras formas de utilização de produtos naturais. Destaca-se, que as civilizações Chinesa, Greco-romana e Egípcia se sobressaíram no uso desses recursos na medicina, bem como em mecanismos de defesa e controle de pragas (Viegas JR *et al*., 2006; Piccirillo & Amaral, 2018).

Os compostos provenientes do metabolismo secundários das plantas, podem ser conhecidos como compostos bioativos ou aleloquímicos. Quando liberados no meio, os compostos bioativos apresentam a capacidade de promover interferências em outros organismos e microrganismos, que estão no seu entorno, tais interferências, podem ser observadas nas fases de germinação e desenvolvimento inicial das plantas, quando esses compostos secundários são liberados no solo (alelopatia) (Brass, 2009; Hüller & Schock, 2011). De tal modo, os compostos bioativos presentes nas plantas, também possuem capacidade antimicrobiana e antioxidante, tendo destaque os fenólicos, carotenoides e flavonoides (Silva *et al.,* 2010).

Os antioxidantes, auxiliam na proteção e manutenção da saúde, gerando benefícios na restauração do equilíbrio fisiológico e modulação das vias biológicas (Smeriglio *et al*., 2019). Antioxidantes endógenos, tem funções no equilíbrio da produção de antioxidantes e sua manutenção, por serem proteínas que protegem os tecidos contra danos provenientes do estresse oxidativo (Singh *et al*., 2019; Jawed *et al.,* 2019). Já na indústria, a oxidação lipídica é um dos problemas mais enfrentados, uma vez que, provoca nos produtos odores e sabores ruins (Santos *et al*., 2020). Dessa forma, a busca por alternativas que substituam a utilização de antioxidantes sintéticos na indústria é necessária, além de produtos naturais como fonte de antioxidantes para a saúde humana e animal.

Já os antimicrobianos, estão relacionados principalmente, a resistência bacteriana, que são resultado, de cepas de microrganismos, com capacidade de multiplicação em altas concentrações de antimicrobianos, tal capacidade, é decorrente do uso excessivo e sem o devido controle, dos agentes antimicrobianos (Wannmacher, 2004). Sendo assim, a busca por antimicrobianos de origem natural, que possam inibir o crescimento de microrganismos com resistência aos antimicrobianos é de extrema importância.

Mediante ao panorama apresentado até o momento, a disseminação de estudos voltados para os nanomateriais vem recebendo destaque, por apresentarem, dentro das suas variadas capacidades, a de interação com os extratos vegetais através da síntese verde. De tal forma, os nanomateriais apresentam dimensões na escala de nanômetro (nm), com tamanho de 0,1 e 100 nanômetros (Mohanraj & Chen 2006) e sua síntese em laboratório, pode ser dividida em dois métodos, sendo eles, químicos e físicos. Os métodos químicos (*bottom up*), tem o envolvimento de espécies moleculares em reações químicas, resultando no crescimento de aglomerados, como exemplos, síntese eletroquímica, uso de elementos biológicos, hidrotermal e solvotermal, já os físicos (*top down*), fazem utilização de processos físicos, com fotolitografia, moagem e têmpera, irradiação, difusão e outros (Ju-Nam & Lead, 2008; Carvalho, 2013).

Dentro da ampla quantidade de tipos de nanopartículas, se tem as metálicas, como zinco e a prata, que possuem alta atividade antimicrobiana, já sendo utilizadas pela indústria em geral e indústria de alimentos (Nano & Me, 2011). As nanopartículas de prata

apresentam atividade antimicrobiana, por conta de terem grande área superficial, proporcionando um contato melhor com os microrganismos (Morones *et al*., 2005; Song *et al*., 2006). Outro exemplo, são as nanopartículas de cobre, que por sua vez são micronutrientes de grande valia para as plantas (Ahamed *et al*., 2014), podem atuar como inibidoras ou estimuladoras nas plantas, de acordo com a concentração escolhida para aplicação nas mesmas (hormese) (Anderson *et al*., 2018; Wang *et al*., 2019; Vanti *et al*., 2020; Juárez-Maldonado *et al*., 2021).

Entretanto, a elevada demanda de nanopartículas pela indústria, acende um alerta quanto a preocupações voltadas ao meio ambiente, fazendo com que se busque, síntese de nanopartículas e desenvolvimento de métodos mais sustentáveis, dando destaque assim, para a síntese verde de nanopartículas, que substitui o uso de reagentes convencionais, por extratos vegetais, não gerando resíduos tóxicos (Sharma *et al.,* 2018). Os compostos presentes na totalidade da planta, com exemplos, enzimas, flavonóides e aminoácidos, apresentam ação redutora e estabilizadora, tornando a síntese verde, um método de baixo custo de produção e alto rendimento (Mittal *et al*., 2013).

A família Myrtaceae, tem cerca de 132 gêneros e 5.950 espécies, sendo distribuída em regiões tropicais e subtropicais do planeta (Farag *et al.,* 2018). Seus óleos essenciais e extratos vegetais, recebem destaque quanto as suas propriedades aromáticas e medicinais (Bida *et al.,* 2019), tendo suas atividades biológicas descritas com frequência, como exemplo: ação antibacteriana e anticâncer (Dias *et al*., 2019), antioxidante (Maggio *et al.,* 2019; Santana *et al.,* 2022), antimicrobiana (Santana *et al*., 2022), antiparasitária (Gevú *et al*., 2019), entre outras.

Nativa do Brasil, a espécie *Myrcia glomerata* (Cambess.) G.P.Burton & E.Lucas que será estudada no presente trabalho, tem presença no domínio fitogeográfico de Mata Atlântica, forma de vida arbórea, caule com crescimento simpodial, folha adaxial com nervura-central completamente canelado, aplanado, com formato da folha elíptica, ovada, espatulada e oblonga (Santos *et al.*, 2023).

Existem poucos estudos sobre a espécie em questão, mas devido, as diversas atividades biológicas expressadas pela família Myrtaceae e pelo gênero *Myrcia*, deter diversas propriedades terapêuticas, tais como a presença de atividade antioxidante, antiflamatória, citotóxica (Stefanello *et al.*, 2011) e o uso para controle de diabetes, pela medicina popular, de espécies como a *Myrcia salcifolia*, *Myrcia multiflora* e *Myrcia shaerocarpa* (Russo *et al.,* 1990), a espécie, a ser estudada, se destaca para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a compreensão e entendimento de suas atividades biológicas.

Sendo assim, o presente capítulo tem por objetivo revisar sobre os compostos bioativos dos extratos vegetais de espécies da família Myrtaceae, destacando a *Myrcia glomerata*, com abordagens sobre métodos de extração, atividades biológicas e síntese verde de nanopartículas como possíveis aplicações sustentáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. COMPOSTOS BIOATIVOS E OS EXTRATOS VEGETAIS

As plantas, apresentam em sua totalidade, compostos bioativos, também conhecidos como aleloquímicos. Esses compostos, são provenientes do metabolismo secundário das plantas e quando liberados no solo podem promover interferências

positivas ou negativas, em outros organismos ou microrganismos, que estão em seu entorno (alelopatia), assim como, podem apresentar atividade antimicrobiana e antioxidante (Brass, 2009; Silva *et al*., 2010).

Por apresentarem tais atividades, estudos com extratos vegetais são muito realizados atualmente. Nos extratos, se tem a presença dos compostos bioativos, e as suas preparações são concentradas, tendo em sua composição alcalóides, cumarinas e terpenóides, além de ligninas, taninos e compostos fenólicos, sendo assim, dentre as várias formas de se obter os extratos vegetais, algumas são: por maceração, infusão, solventes como a água e por solventes orgânicos (Handa, 2008; Silveira, 2012; Pandini, 2014; Weber *et al.,* 2014).

Os alcalóides são compostos nitrogenados heterocíclicos, sendo precursores de compostos biologicamente ativos, tendo propriedade antibacterianas, citotóxica, antifúngicas e outras (Silva *et al*., 2007; Lu *et al.,* 2012; Savoia, 2012). Já os flavonoides, são mediadores na defesa das plantas, contra agentes antimicrobianos, proteção contra a radiação ultravioleta, entre outros (Huber & Rodriguez-Maya, 2008).

Sendo assim, a identificação dos compostos bioativos presentes nas espécies vegetais é de extrema importância, pois, quando sabemos quais compostos estão presentes, podemos deduzir suas possíveis atividades biológicas e direcionar as pesquisas para desenvolvimento de novos produtos de origem natural.

2.2. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

Para se obter os compostos bioativos presentes nas plantas, são necessárias técnicas especificas, como as que utilizam de equipamentos, solventes, entre outros. Quando extraídos, os compostos bioativos podem vir a apresentar determinadas atividades biológicas, que podem ser utilizadas na indústria alimentícia, farmacêutica, cosmética, na agricultura etc. Algumas técnicas de extração são:

Maceração: é um método onde se tem a mistura do pó da planta estudada com um solvente (água, etanol, metanol etc) por um determinado período, geralmente em temperatura ambiente. Esta forma de extração é simples, muito utilizada e proporciona a difusão dos compostos solúveis no solvente, sendo realizado posteriormente a filtração do extrato para se separar massa vegetal do extrato final (Tiwari *et al*., 2011; Pandey *et al.,* 2014);

Soxhlet: é um método semi-contínuo, onde o pó da planta é colocado dentro extrator Soxhlet e se aquece o solvente para evaporá-lo e condensá-lo repetidamente, para se ter a lixiviação dos compostos bioativos do material vegetal (Mustafa & Turner, 2011).

Fluidos supercríticos: utiliza o dióxido de carbono (CO_2) em alta pressão e temperatura, onde o fluido apresenta propriedades liquidas e gasosas, tal método, tem alta eficiência e é sustentável, principalmente para compostos termolábeis, por não deixar resíduos de solventes (Reverchon & De Marco, 2006).

Extração assistida por ultrassom (UAE): utiliza de ondas ultrassônicas para aumentar a eficiência da extração dos compostos bioativos. Quando aplicadas ao solvente contendo o pó vegetal, as ondas ultrassônicas, criam cavitação acústica, formação, crescimento e implosão de bolhas de gás no líquido, gerando microjatos e ondas de choque, em altas pressões que acabam rompendo a parede celular das plantas facilitando

a penetração do solvente nas células vegetais, ocasionando a liberação dos compostos (Vilkhu *et al.,* 2008; Chemat *et al*., 2017).

As vantagens da extração assistida por ultrassom incluem, ser um método de extração rápido, pode ser realizado com temperaturas mais baixas, beneficiando a extração de compostos termossensíveis, utiliza-se menores quantidades de solvente, proporcionando um processo mais sustentável e de menor custo e aumento na eficiência e rendimento da extração, extraindo maiores quantidades e variedades de compostos bioativos do material vegetal, como flavonoides, alcaloides, terpenoides, polifenóis, entre outros (Grosso *et al*., 2015; Wang & Weller, 2006).

2.3. ATIVIDADE ANTIMICROBIANA DOS EXTRATOS

O uso indiscriminado de antimicrobianos tem resultado na seleção de bactérias resistentes aos diversos agentes antibacterianos e tal resistência, se deve a cepas de microrganismos, com capacidade de multiplicar-se em concentrações mais altas de antimicrobianos, do que as doses que advém de doses terapêuticas ministradas aos humanos (Wannmacher, 2004; Silveira, 2006).

Além disso, o uso de produtos sintéticos inadequadamente, resulta em problemas para humanos, animais e meio ambiente, o que leva as indústrias a procurarem produtos de origem natural, por serem menos agressivos e tóxicos ao meio ambiente e ao homem (Packer & Luz, 2007; Ostrosky *et al.*, 2008; Machado & Junior, 2011; Silva *et al.,* 2018). Desse modo, estudos para descoberta de plantas, que contenham atividade antimicrobiana, é cada vez maior, por virem a ser possíveis substitutas dos produtos sintéticos.

2.4. ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DOS EXTRATOS

Os antioxidantes são de extrema importância, pois, auxiliam no controle e na diminuição de danos oxidativos em células, resultantes da presença de radicais livres. Existem variadas classes dentre os antioxidantes, os compostos fenólicos, por exemplo, têm como abrangência, classes como antocianinas, flavonas, flavonoides e outros, o ácido ascórbico (vitamina C), também é pertencente a classe dos antioxidantes (Feitosa, 2017).

Os flavonoides, desempenham várias funções na planta, algumas delas são: proteção contra insetos, vírus, fungos, bactérias, radiação ultravioleta entre outras (Santos & Rodrigues, 2017), além de serem caracterizados, como inibidores de células cancerosas, por apresentarem propriedades antioxidantes, que possivelmente, são responsáveis por controlar a proliferação dessas células e bloqueio da oncogênese (Hung et al., 2009; Amado *et al.,* 2011).

O estresse oxidativo, é resultado da produção exagerada de espécies reativas de oxigênio (EROs) e nitrogênio (ERNs) além de fatores exógenos, que podem resultar em problemas na homeostase do organismo, por conta do desequilíbrio gerado no sistema oxidante e antioxidante, desencadeando alterações funcionais e estruturais de proteínas, peroxidação lipídica e danos no DNA (Vasconcelos *et al.,* 2007; Rahaman *et al*., 2023). Enzimas catalase, glutationa e superóxido dismutase, são antioxidantes endógenos e estão envolvidos no equilíbrio e manutenção dos agentes oxidantes, tendo atuação na proteção dos tecidos contra danos provenientes das ERNs e EROs, todavia, se houver debilitação no sistema antioxidante e excesso de produção dos radicais oxidantes, se tem

o desencadeamento do estresse oxidativo, que se expressa através da aceleração no processo de envelhecimento e aparecimento de doenças (Rahal *et al.,* 2014; Jawed *et al*., 2019; Singh *et al.,* 2019).

Sendo assim, os estudos voltados para antioxidantes de origem vegetal, como os óleos essenciais e extratos vegetais, vem sendo cada vez mais frequentes, por conta da atividade antioxidante apresentada por essas substâncias, que proveem bioativos benéficos a saúde, controlando os radicais livres nas células e até mesmo evitando deterioração de alimentos (Pupo & Gallo, 2007; Tomei & Salvador, 2007; Moon & Shinamoto, 2009).

2.5. NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

As nanopartículas, apresentam propriedades inovadoras por conta de suas particularidades em relação a tamanho, morfologia e distribuição (Fracassetti *et al.,* 2013). Desse modo, a estrutura dos nanomateriais são dimensões na escala de nanômetro (nm), com tamanho de 0,1 e 100 nanômetros (Mohanraj & Chen 2006). Na natureza, podemos encontrar algumas destas nanopartículas, como exemplo, polissacarídeos, óxidos de ferro, peptidoglicanos e substâncias húmicas (Ju-Nam & Lead, 2008).

Entretanto, a síntese em laboratório de nanopartículas também é uma possibilidade, onde tamanho, forma, propriedades físicas e químicas do material, são características controladas. Dentre as várias possíveis aplicações dessas nanopartículas, algumas são: na indústria farmacêutica, medicina, cosmético, alimentos, agricultura, entre outros (Ju-Nam & Lead, 2008).

Dentre as nanopartículas metálicas (ouro, prata, cobre etc.), as nanopartículas de prata despertam grande interesse na indústria, por conta de suas propriedades de elevado efeito catalítico, boa condutividade, atividade antimicrobiana e elevada área superficial, podendo ser usadas para prevenção de colonização bacteriana em próteses e cateteres, redução de infecções e na indústria de alimentos (Guzmán *et al.,* 2009).

Contudo, a crescente demanda de nanopartículas pela indústria traz à tona a preocupação com o meio ambiente, instigando o desenvolvimento de métodos de síntese de nanopartículas mais sustentáveis. A síntese verde de nanopartículas, substitui o uso dos reagentes convencionais, por extratos vegetais, que reduzem os íons Ag^{+} em nanopartículas, através de uma etapa única, sem gerar resíduos tóxicos, tornando o método mais sustentável (Sharma *et al.,* 2008). As enzimas, aminoácidos, proteínas, flavonóides, metabólitos hidrossolúveis e compostos heterocíclicos, presentes nas plantas podem ter ação redutora e estabilizadora, sendo encontradas nas folhas, talos, sementes ou cascas das plantas, sendo um método de baixo custo de produção e elevado rendimento (Mittal *et al.,* 2013).

Alguns exemplos, da utilização de nanopartículas na agricultura, são descritos por Park e colaboradores (2006), onde o desenvolvimento de uma nanopartícula de sílica-prata, resultou em atividade antimicrobiana contra *Xanthomonas compestris*, *Pythium sp.* e *Pseudomonas syringae*, que são fitopatógenos. Outros patógenos de plantas, que podem ser controlados pelas nanopartículas de prata são: *Fusarium culmorum* (Kasprowicz *et al*., 2010), *Colletotrichum sp*. (Lamsal *et al*., 2011) e mofo cinza do morango (Moussa *et al*., 2013).

2.6. SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS

As nanopartículas podem ser sintetizadas via síntese verde, que é uma forma sustentável de obtenção de nanopartículas, na qual, utiliza de materiais biológicos, como os extratos vegetais, que vão atuar como agentes redutores e estabilizadores. A síntese verde, vem ganhando destaque, por conta de ser sustentável, de baixo custo e impacto ambiental, quando comparado aos métodos convencionais, que se utilizam de síntese física e química (Varughese *et al.,* 2020; Khatiwara *et al*., 2022).

Nanopartículas metálicas e de óxido de metais, também podem ser produzidas via síntese verde, tais nanopartículas apresentam variadas formas de aplicação em diversas áreas, como na química analítica, remediação ambiental, medicina, indústria farmacêutica, entre outras (Ju-Nam & Lead, 2008). O processo de síntese, geralmente envolve o uso de componentes biodegradáveis e sem toxicidade, como exemplo os polifenóis presentes nas folhas das plantas, e podem ser realizados em temperatura ambiente, reduzindo ainda mais possíveis danos ambientais (Mareedu *et al*., 2021; Priya *et al*., 2021).

2.7. ALELOPATIA E OS ALELOQUÍMICOS

A alelopatia tem seu termo cunhado por Molisch (1937) e se deve a influência de um indivíduo sobre o outro, seja favorecendo ou prejudicando o mesmo, resultante da atividade dos compostos secundários ou aleloquímicos, que são liberados pelas plantas, podendo promover efeitos inibitórios ou estimulantes sobre outros organismos, tais características, podem ser utilizadas como alternativa ao uso da grande variedade de defensivos agrícolas (Rice, 1984; Ferreira & Aquila, 2000). Segundo os mesmos autores, tanto a tolerância ou resistência aos aleloquímicos, é mais ou menos específica, havendo plantas mais sensíveis que outras, como por exemplo o alface (*Lactuca sativa*) e tomate (*Lycopersicum esculentum*), nas plantas lenhosas, pela maioria ser perene e então mais suscetíveis a ataques de patógenos e predadores, se teve favorecimento no desenvolvimento dos metabólitos secundários para a sua própria defesa e nisso alguns aspectos às distinguem quanto à alelopatia como: interação continuada por vários anos com a microflora; queda sazonal das folhas, se a planta for caducifólia ou acrescentando matéria morta a serrapilheira se for perenifólia; tempo de decomposição dos elementos lenhosos; tempo de decomposição da matéria morta maior, proporcionando maior persistência do aleloquímicos e ocupação por epífitos.

Proveniente do metabolismo secundário das plantas, os aleloquímicos são substâncias como os flavonoides, terpenoides, ácidos fenólicos, alcalóides e glicosídeos, que quando liberados no meio, por processos de lixiviação, exsudação radicular, decomposição de massa vegetal, podem promover vantagens nas competições intraespecíficas e interespecíficas, além de interferências em outros organismos e microrganismos (Inderjit & Duke, 2003; Macías *et al.,* 2007; Brass, 2009). O efeito dos aleloquímicos costumam ser mais observados nas fases de germinação e desenvolvimento das plântulas, visto que, a germinação é o parâmetro mais utilizado para se fazer a análise do efeito alelopático, por conta da quantificação experimental ser simples (Hüller & Schock, 2011). Segundo os autores, tais substâncias provocam certas alterações, na divisão celular, fotossíntese por conta das funções de determinadas enzimas, absorção de nutrientes e germinação do pólen.

2.8. POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE ÁRVORES NATIVAS BRASILEIRAS E A FAMÍLIA MYRTACEAE

O potencial biotecnológico, é capacidade de organismos vivos, como microrganismos, animais e plantas serem utilizados para o desenvolvimento de produtos e processos em áreas de produção de medicamentos, biorremediação ambiental, biofertilizantes, entre outros para o beneficiamento da sociedade (Glick & Patten, 1998).

As arvores nativas brasileiras, apresentam uma ampla variedade de compostos bioativos com capacidades biotecnológicas, compostos como flavonoides, terpenos e taninos, apresentam propriedades antioxidantes, antimicrobianas e farmacológicas (Nascimento *et al*., 2013). Exemplos: pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) propriedades antioxidantes e antimicrobianas; andiroba (*Carapa guianensis*) anti-inflamatória e repelente de insetos (Lorenzi & Matos, 2002).

A família Myrtaceae, tem abrangência de cerca de 132 gêneros e 5.950 espécies, sendo localizadas em regiões tropicais e subtropicais do planeta (Farag *et al.,* 2018). Os óleos essenciais dos representantes da família, contém propriedades aromáticas e medicinais (Bida *et al.,* 2019), tendo suas atividades biológicas descritas com frequência, como exemplo: ação antibacteriana e anticâncer (Dias *et al.,* 2019), antioxidante (Maggio *et al*., 2019), antiparasitário (Gevú *et al*., 2019), entre outras. Extratos vegetais de *Myrcia oblongata*, pertencente à família Myrtaceae, também apresentam atividade antioxidante e antimicrobiana (Santana *et al*., 2022).

Em um estudo realizado por Ribeiro e colaboradores (2022), foi possível se identificar as principais atividade biológicas dos gêneros *Eugenia* e *Psidium*, ambos pertencentes a família Myrtaceae, onde, o gênero *Eugenia* apresentou, dentre as suas várias atividades, a de citotoxicidade, antibacteriana, antioxidante, inseticida, bioherbicida e outras, já para o gênero *Psidium*, foram identificadas, atividade citotóxica, antioxidante, antibacteriana, larvicida e outras.

2.9. GÊNERO *Myrcia* E A ESPÉCIE *Myrcia glomerata*

O gênero *Myrcia*, tem destaque pelo seu potencial terapêutico, sendo que muitas espécies, já apresentaram atividade antioxidante, antiflamatória, analgésica e citotóxica, e a relação deste gênero com seu uso na medicina popular para diabetes, tem muitos relatos (Russo *et al.,* 1990; Stefanello *et al.,* 2011). Dentro do gênero *Myrcia,* várias espécies já foram estudadas quanto aos seus potenciais biológicos. As espécies de *Myrcia multiflora*, *M. shaerocarpa* e *M. salcifolia* são utilizadas no tratamento da diabetes (Russo *et al*., 1990), *M. amazonica* tem suas folhas utilizadas para tratamento de leucemia (Mors et al., 2000) e *Myrcia hatschbachii* D. Legrand tem seu óleo essencial, que pode ser usado como bioherbicida e apresenta atividade antibacteriana para *Staphylococcus aureus* e *Enterococcus faecalis* (Gatto *et al.,* 2020).

Neste contexto, a espécie *Myrcia glomerata* (Cambess.) G.P.Burton & E.Lucas que é presentada na presente revisão, é nativa do Brasil, tem presença no domínio fitogeográfico de Mata Atlântica, forma de vida arbórea, caule com crescimento simpodial, folha adaxial com nervura-central completamente canelado, aplanado, com formato da folha elíptica, ovada, espatulada e oblonga (Santos *et al.,* 2023). Estudos com essa espécie, são pouco encontrados na literatura. Em um estudo realizado por Nascimento e colaboradores (2022), foi demonstrado que os extratos foliares de *Myrcia glomerata* (G.

Burton & Lucas) apresentaram elevada atividade antimicrobiana frente a *Samonella enterica* e baixa citotoxicidade.

Por se ter, poucos estudos com a espécie que será estudada, o presente trabalho vem a contribuir, apresentando a atividade antimicrobiana, antioxidante e alelopática das folhas dessa espécie nativa e suas nanopartículas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As árvores nativas brasileiras, incluindo espécies da família Myrtaceae, representam um importante recurso para a biotecnologia, dada sua vasta diversidade de compostos bioativos com propriedades antioxidantes, antimicrobianas, alelopáticas e terapêuticas. A espécie *Myrcia glomerata*, nativa do Brasil, tem seu gênero *Myrcia* com diversas atividades biológicas descritas, mas a espécie em questão escassa em estudos. Este capítulo reforça a importância de estudos científicos com essa espécie, considerando as suas propriedades bioativas e aplicações potenciais do seu gênero.

Além disso, a nanotecnologia verde, que utiliza extratos vegetais para a síntese de nanopartículas, apresenta-se como uma abordagem inovadora e sustentável. Esse método de síntese reduz os impactos ambientais, além de oferecer aplicações práticas para as indústrias farmacêuticas, alimentícias e agrícolas.

REFERÊNCIAS

[1] AHAMED, M. et al. Synthesis, characterization, and antimicrobial activity of copper oxide nanoparticles. **Journal of Nanomaterials**. 2014.

[2] AMADO, N. G. et al. Flavonoids: potential wnt/beta-catenin signaling modulators in cancer. **Life Sciences**. v.89, n.15-16, p. 545-554, 2011.

[3] ANDERSON, A. J. et al. CuO and ZnO nanoparticles modify interkingdom cell signaling processes relevant to crop production. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v.66, p.6513–6524, 2018. DOI: https://doi.org/10.1021/acs. jafc.7b01302.

[4] BIDA, M. R. et al. Essential oil compounds from the leaf of *Eugenia samanensis* Alain (Myrtaceae), a species endemic to the Samaná Peninsula, Dominican Republic. **Journal of Essential Oil Research**. v.31, n.2, p.154-159, 2019. DOI: 10.1080/10412905.2018.1518275.

[5] BRASS, F. E. B. Análise de atividade alelopática de extrato aquoso de falsa-murta sobre a germinação de picão-preto e caruru. **Centro Científico Conhecer – Enciclopédia Biosfera**. Goiânia, v.5, n.8, 2009.

[6] CARVALHO, C. N. Caracterização de nanopartículas de prata coloidais dispersas em solos. 2013. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.

[7] CARVALHO, W. P. et al. Alelopatia de adubos verdes sobre feijoeiro comum *(Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Biociências**. Porto Alegre, v.10, n.1, p.86-93, 2012.

[8] CHEMAT, F. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.34, p.540-560, 2017.

[9] DIAS, A. L. B. et al. Chemical composition and in vitro antibacterial and antiproliferative activities of the essential oil from the leaves of *Psidium myrtoides* O. Berg (Myrtaceae). **Natural Product Research**. v.33, n.17, p.2566-2570, 2019. DOI: 10.1080/14786419.2018.1457664.

[10] FARAG, N. F. et al. Characterization of essential oils from Myrtaceae species using ATR-IR vibrational spectroscopy coupled to chemometrics. **Industrial Crops and Products**. v.124, p.870-877, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.07.066.

[11] FEITOSA, C. M. **Antioxidantes aspectos químicos, farmacológicos e terapêuticos**. Editora Átomo. Campinas-SP, p.11-137, 2017.

[12] FERREIRA, A. G. & AQUILA, M. E. A. Alelopatia: uma área emergente da ecofisiologia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. v.12, p.175-204, 2000.

[13] FRACASSETTI, D. et al. Ellagic acid derivatives, Ellagitannins, Proanthocyanidins and Other Phenolics, Vitamin C and Antioxidant Capacity of two Powder Products from Camu-camu Fruit (*Myrciaria dubia*). **Food Chemistry**. v.139, p.578-588, 2013.

[14] GATTO, L. J. et al. Chemical composition, phytotoxic potential, biological activities and antioxidant Properties of *Myrcia hatschbachii* D. Legrand essential oil. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**. v.56, e18402, 2020.

[15] GEVÚ, K. V. et al. Chemical Composition and Anti-Candida and Anti-Trypanosoma cruzi Activities of Essential Oils from the Rhizomes and Leaves of Brazilian Species of Renealmia L. fil. **Records of natural products**. v.13, n.3, p.268-280, 2019. DOI: 10.25135/rnp.105.18.08.125.

[16] GLICK, B. R. & PATTEN, C. L. (1998). Molecular Biotechnology: **Principles and Applications of Recombinant DNA**. Editora: ASM Press, 4 edição, Washington, D.C.

[17] GROSSO, C. et al. Alternative and efficient extraction methods for marine-derived compounds. **Marine Drugs**. v.13, p.3182-3230, 2015.

[18] GUZMÁN, M. G.; DILLE, J.; GODET, S. Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity. **International Journal of Chemical and Biomolecular Engineering**. v.2, p.3, 2009.

[19] HANDA, S. S. **An overview of extraction techniques for medicinal and aromatic plants**. In: HANDA, S. S. *et al*. Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants. Trieste: United Nations Industrial Development Organization and the International Centre for Science and High Technology (ICS - UNIDO), p. 21-54, 2008.

[20] HUBER, L. S.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Flavonoids and flavones: the Brazilian sources and factors that influence the composition in food. A**limentos e Nutrição**. v.19, n.1, p.97-108, 2008.

[21] HÜLLER, A.; SCHOCK, A. A. Avaliação do potencial alelopático de três espécies de *Eugenia* L. (Myrtaceae) sobre o processo germinativo de *Lactuca sativa* L. **Revista de Ciências Ambientais**. Canoas, v.5, n.1, p.25-37, 2011.

[22] HUNG, J. Y. et al. Didymin, a dietary flavonoid glycoside from citrus fruits, induces fas-mediated apoptotic pathway in human non-small-cell lung cancer cells in vitro and in vivo. **Lung Cancer**. v.68, n.3, p.366-374, 2009.

[23] INDERJIT,; DUKE, S. O. Ecophysiological aspects of allelopathy. **Planta**. v.217, n.4, p.529-539, 2003.

[24] JAWED, H. et al. Antioxidative activity of clove (*syzygium aromaticum*) oil administration in Middle cerebral artery occlusion (mcao) Models of acute focal cerebral ischemia. **Pakistan Journal of Neurological Sciences (PJNS)**. v.14, n.1, p.10-15, 2019.

[25] JÚAREZ-MALDONADO, A. et al. Biostimulation and toxicity: the magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. **Journal Advanced Research**. 2021.

[26] JU-NAM, Y.; LEAD, J. R. Manufactured nanoparticles: An overview of their chemistry interactions and potential environmental implications. **Science of The Total Environment**. v.400, p.396–414, 2008.

[27] KASPROWICZ, M. J.; KOZIOL, M.; GORCZYCA, A. The effect of silver nanoparticles on phytopathogenic spores of Fusarium culmorum. **Canadian Journal of Microbiology**. v.56, n.3, p.247-253, 2010.

[28] KHATIWARA, B. et al. Application of plant extracts for the synthesis of nanoparticles in green chemistry: a concise update. **Bentham Sience: Current nanomaterials**. v.8, p.224-232, 2023.

[29] LAMSAL, K. et al. Application of silver nanoparticles for the control of Colletotrichum species in vitro and pepper anthracnose disease in the field. **Mycobiology**. v.39, n.3, p.194–199, 2011.

[30] LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas Medicinais no Brasil: Nativas e Exóticas**. Instituto Plantarum, Nova Odessa - SP, 2002.

[31] LU, J. J. et al. Alkaloids isolated from natural herbs as the anticancer agents. **Evidence Based Complementary and Alternative Medicine**. v.2012, p.1-12, 2012.

[32] MACHADO, B. F. M. T.; JUNIOR, M. A. F. Óleos essenciais: aspectos gerais e usos em terapias naturais. **Cadernos Acadêmicos**. v.3, n.2, p.105–127, 2011. Acesso em: http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/Cadernos_Academicos/article /view/718/671.

[33] MACÍAS, F. A. et al. **Allelopathy: chemistry and mode of action of allelochemicals**. CRC Press, Boca Raton, 2007.

[34] MAGGIO, A. et al. Comparative chemical composition and bioactivity of leaves essential oils from nine Sicilian accessions of *Myrtus communis* L. **Journal of Essential Oil Research**. p.1-10, 2019. DOI: 10.1080/10412905.2019.1610089.

[35] MAREEDU, T.; POIBA, V. R.; VANGALAPATI, M. Green synthesis of iron nanoparticles by green tea and black tea leaves extract. **Materialstoday: Proceedings**. v.42, p.1498-1501, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.444.

[36] MITTAL, A. K.; CHRISTI, Y.; BANERJEE, U. C. **Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts**. 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975013000050.

[37] MOHANRAJ, V. J.; CHEN, Y. Nanoparticles – A Review. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research**. v.5, p.561-573, 2006.

[38] MOLISCH, H. **Der Einfluss einer Pflanze auf die andere Allelopathie**. Jena, Fischer. 1937.

[39] MOON, J. K.; SHINAMOTO, T. Antioxidant assays for plant and food components. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v.57, p.1655- 1666, 2009.

[40] MORONES, J. R. et al. The bactericidal effect of silver nanoparticles. **Nanotechnology**. Bristol, v.16, p.2346-2353, 2005.

[41] MORS, W. B.; RIZZINI, C. T.; PEREIRA, N. A. **Medicinal Plants of Brasil**. Reference Publications, Inc. Algonac, Michigan, p.501, 2000.

[42] MOUSSA, S. H. et al. Botryticidal activity of nanosized silver-chitosan composite and its application for the control of gray mold in strawberry. **Journal of Food Science**. v.78, n.10, p.1589–1594, 2013.

[43] MUSTAFA, A.; TURNER, C. Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: A review. **Analytica Chimica Acta**. v.703, n.1, p.8-18, 2011.

[44] NANO & ME. **Nano in packaging**. 2011. Disponível em: http://www.nanoandme.org/nano-products/packaging/safety-issues/.

[45] NASCIMENTO, M. L. R. et al. ***Myrcia glomerata* (G. Burton & Lucas): composição fitoquímica de extratos foliares, atividade antimicrobiana frente à sorotipos de *Samonella* avícola e toxicidade sobre *Artemia salina* L.** In: Pesquisas em temas: ciências da saúde. RFB Editora. Belém -PA, 1ª edição, v.23, p. 267-289, 2022. DOI: 10.46898/rfb.becbce3f-2a34-4424-a51de8ee66b9a23c.

[46] NASCIMENTO, N. R. F. et al. Chemical composition and pharmacological activities of the essential oils from two species of Myrtaceae. **Journal of Ethnopharmacology**. v.145, n.1, p.133-141, 2013.

[47] OSTROSKY, E. A. et al. Métodos para avaliação da atividade antimicrobiana e determinação da Concentração Mínima Inibitória (CMI) de plantas medicinais. **Revista Brasileira de Farmacognosia**. v.18, n.2, p.301– 307, 2008.

[48] PACKER, J. F.; LUZ, M. M. S. Método para avaliação e pesquisa da atividade antimicrobiana de produtos de origem natural. **Revista Brasileira de Farmacognosia**. v.17, n.1, p.102–107, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102- 695X2007000100019.

[49] PANDEY, A. et al. Phytochemical analysis of leaf extract of *Phyllanthus fraternus*. **Research Journal of Recent Sciences**. v.3, n.12, p.24-26, 2014.

[50] PANDINI, J. A. **Composição química, atividade antimicrobiana, inseticida e antioxidante do óleo essencial e extratos de *Guarea kunthiana* A. Juss**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Conservação e Manejo de Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR, 2014.

[51] PARK, H. J. et al. A new composition of nanosized silica-silver for control of various plant diseases. **The Plant Pathology Journal**. v.22, p.295-302, 2006.

[52] PICCIRILLO, E.; AMARAL, A. T. Busca virtual de compostos bioativos: conceitos e aplicações. **Química Nova**. v. 41, n. 6, p. 662-677, 2018.

[53] PRIYA, N.; KAUR K.; SIDHU, A. K. Green Synthesis: An Eco-friendly Route for the Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles. **Frontiers in Nanotechnology**. v.3, 655062, 2021.

[54] PUPO, M. T.; GALLO, M. C. B. Biologia química: uma estratégia para a pesquisa em produtos naturais. **Química Nova**. v. 30, p. 1446-1455, 2007.

[55] RAHAL, A. et al. Oxidative stress, prooxidants, and antioxidants: the interplay. **BioMed research international**. 2014. DOI:10.1155/2014/761264.

[56] RAHAMAN, M. M. et al. Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. **Food Science & Nutrition**. v.11, p.1657-1670, 2023.

[57] REVERCHON, E.; DE MARCO, I.Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. **The Journal of Supercritical Fluids**. v.38, n.2, p.146-166, 2006.

[58] RIBEIRO, C. L.; PAULA, J. A. M.; PEIXOTO, J. C. Propriedades farmacológicas de espécies dos gêneros*: Myrcia, Eugenia e Psidium* – Myrtaceae, típicas do Cerrado: Uma revisão de escopo. **Research, Society and Development**. v.11, n.8, 2022.

[59] RICE, E. L. Allelopathy. **Academic Press**, Orlando, Florida, 1984.

[60] ROLIM, W. R. et al. Green tea extract mediated biogenic synthesis of silver nanoparticles: Characterization, cytotoxicity evaluation and antibacterial activity. **Applied Surface Science**. v.463, p.66-74, 2019.

[61] RUSSO, E. M. K. et al. Clinical trial of *Myrcia uniflora* and *Bauhinia forficata* leaf extracts in normal and diabetic patients. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**. v.23, n.1, p.11–20, 1990.

[62] SANTANA, C. B. et al. Antimicrobial and insecticidal effects of essential oil and plant extracts of *Myrcia oblongata* DC in pathogenic bactéria and *Alphitobius diaperinus*. **Brazilian Journal of Biology**. v 82, e233425, ISSN 1678-4375, 2022.

[63] SANTOS, D. S.; RODRIGUES, M. M. F. Atividades farmacológicas dos flavonóides: um estudo de revisão. **Estação Científica (UNIFAP)**. Macapá, v.7, n.3, p.29-35, 2017.

[64] SANTOS, J. R. N. et al. Avaliação da atividade bactericida e antioxidante do óleo essencial e do extrato hidroalcoólico de orégano (*Origanum vulgare*). **Research Society and Development**. v.9, n.10, e7829108410, 2020.

[65] SANTOS, M. F. et al. *Myrcia* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: Acesso em: 05 jul. 2024.

[66] SAVOIA, D. Plant-derived antimicrobial compounds: alternatives to antibiotics. **Future Microbiology**. v. 7, p. 979–990, 2012.

[67] SHARMA, V. K.; YNGARD, R. A.; LIN, Y. **Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities**. Chemistry Department, Florida Institute of Technology, 150 West University Boulevard, Melbourne, Florida 32901, USA, v.154, p.83–96, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316621049_Silver_nanoparticles_green_synthesis_approaches.

[68] SILVA, A. C. et al. Resistência antimicrobiana de *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* isolados de carcaças de frangos: Resistência a antibióticos e óleos essenciais. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**. v.8, n.1, p.95–103, 2018.

[69] SILVA, D. B. et al. Isolamento e avaliação da atividade citotóxica de alguns alcaloides oxaporfínicos obtidos de annonaceae. **Química Nova**, v. 30, n. 8, p. 1809-1812, 2007.

[70] SILVA, M. L. C. et al. Compostos fenólicos, carotenóides e atividade antioxidante em produtos vegetais. Semina: **Ciências Agrárias**. v.31, n.3, p.669-681, 2010.

[71] SILVEIRA, G. P et al. Estratégias utilizadas no combate a resistência bacteriana. **Química Nova**. v.29, n.4, p.844-855, 2006. Acesso em: 24 de ago de 2023.

[72] SILVEIRA, S. M. **Avaliação da atividade antimicrobiana e antioxidante de extratos vegetais e óleos essenciais e aplicação do óleo essencial de louro (*L. nobilis*) como agente conservador natural em embutido cárneo frescal**. 2012. 215 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

[73] SINGH, A. et al. Oxidative stress: A key modulator in neurodegenerative diseases. **Molecules**. v.24, n.8, p.1583, 2019.

[74] SMERIGLIO, A. et al. Feijoa Fruit Peel: Micro-morphological Features, Evaluation of Phytochemical Profile, and Biological Properties of Its Essential Oil**. Antioxidants**. v.8, n.8, p.320, 2019. DOI: 10.3390/antiox8080320.

[75] SONG, H. Y. et al. Fabrication of silver nanoparticles and their antimicrobial mechanisms. **European Cells and Materials**. v. 11, p. 58, 2006.

[76] STEFANELLO, M. É. A.; PASCOAL, A. C. R. F.; SALVADOR, M. J. Essential Oils from Neotropical Myrtaceae: Chemical Diversity and Biological Properties. **Chemistry & Biodiversity**. v.8, n.1, p.73–94, 2011.

[77] TIWARI, P. *et al*. Phytochemical screening and extraction: A review. **International Pharmaceutica Sciencia**. v.1, n.1, p.98-106, 2011.

[78] TOMEI, R. R.; SALVADOR, M. J. **Metodologias analíticas atuais para avaliação da atividade antioxidante de produtos naturais**. In: Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, 11., e Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação, 7., 2007, Campinas. Anais. Universidade do Vale do Paraíba, v. 1, p. 1963- 1967, 2007.

[79] VANTI, G. L. et al. Synthesis and application of chitosan-copper nanoparticles on damping off causing plant pathogenic fungi. **International Journal of Biological Macromolecules**. v.156, p.1387–1395, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.ijbiomac.2019.11.179.

[80] VARUGHESE, A.; KAUR, R.; SINGH, P. Green synthesis and characterization of copper oxide nanoparticles using *Psidium guajava* leaf extract. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. v.961, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/961/1/012011.

[81] VASCONCELOS, S. M. L. et al. Espécies reativas de oxigênio e de nitrogênio, antioxidantes e marcadores de dano oxidativo em sangue humano: principais métodos analíticos para sua determinação. **Química Nova**. São Paulo, v. 30, n. 5, p. 1323-1338, 2007.

[82] VIEGAS, J. R. C.; BOLZANI, V. S.; BARREIRO, E. J. Os produtos naturais e a química medicinal moderna. **Química Nova**. v. 29, n. 2, p. 326-337, 2006.

[83] VILKHU, K., et al. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry — A review. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. v.9, n.2, p.161-169, 2008.

[84] WANG, L.; WELLER, C. L. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. **Trends in Food Science & Technology**. v.17, n.6, p.300-312, 2006.

[85] WANG, Y. et al. Effect of metal oxide nanoparticles on amino acids in wheat grains (*Triticum aestivum*) in a life cycle study. **Journal of Environmental Management**. v.241, p.319–327, 2019.

[86] WANNMACHER, L**. Uso indiscriminado de antibióticos e resistência microbiana: Uma guerra perdida?**. Brasília, v.1. n.4, março de 2004, ISSN 1810-0791. Disponível em: https://www.saudedireta.com.br/docsupload/1340027024opas_1_uso_indiscriminado.pdf. Acesso em: 24 de ago de 2023.

[87] WEBER, L. D. et al. Chemical composition and antimicrobial and antioxidant activity of essencial oil and various plant extract from *Prunus myrtifolia* (L.) Urb. **African Journal of Agricultural Research**. v.9, n.9, p.846-853, 2014.

Capítulo 5

Importância da bioprospecção de rizobactérias nativas para promoção de crescimento na cultura do feijoeiro

Luana de Souza[1]
Débora Pedroso[2]
Amanda Janaina Gonsatti Feitosa[3]
Debora Marina Bandeira[4]
Odair Alberton[5]
Renata Mussoi Giacomin[6]
Paulo Roberto da Silva[7]
Aline Snak[8]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[9]

Resumo: O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa de grande importância social e econômica no Brasil, destacando-se como uma fonte acessível de nutrientes essenciais. No entanto, a produção dessa cultura enfrenta desafios significativos, como a baixa fertilidade dos solos e a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos, cujo uso excessivo está associado a impactos ambientais negativos, como a contaminação de recursos hídricos, a emissão de gases de efeito estufa e a degradação do solo. Diante disso, é essencial buscar alternativas mais sustentáveis, como o uso de microrganismos benéficos. A pesquisa de novas rizobactérias nativas é extremamente importante, já que essas bactérias podem ser mais adaptadas às condições ambientais locais do que as inoculadas no feijão. Dessa forma, o Brasil, com sua vasta biodiversidade, tem um potencial significativo para a descoberta de novas bactérias que possam beneficiar a agricultura. Esta revisão bibliográfica visa evidenciar a importância da prospecção de novas rizobactérias de solos nativos do Paraná, com foco na abordagem da produção sustentável do feijoeiro.

Palavras-chave: Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas. Fixação Biológica de Nitrogênio. Inoculantes Biológicos. *Phaseolus vulgaris* L. Sustentabilidade.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0851-2161
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0004-0856-4916
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-4902-0972
[4] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0001-5956-7210
[5] Universidade Paranaense (UNIPAR)/ Umuarama – PR https://orcid.org/0000-0002-4819-6669
[6] Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO)/ Guarapuava – PR https://orcid.org/0000-0003-1568-2107
[7] Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO)/ Guarapuava – PR https://orcid.org/0000-0003-3190-1461
[8] SBS Laboratório – Análises Agronômicas e Veterinárias/ Cascavel, PR, Brasil
[9] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

O feijão comum, *Phaseolus vulgaris* L., é uma leguminosa amplamente produzida no Brasil, atingindo produção média anual de cerca de 3,4 milhões de toneladas (CONAB, 2024). A espécie é representativa socialmente, pois é um dos alimentos mais consumidos, devido sua elevada fonte de proteínas, carboidratos, ferro, zinco, proteínas e vitaminas (Yeken *et al.,* 2018).

O cultivo do feijão comum no Brasil é na sua grande maioria produzida por pequenos agricultores (Araújo *et al.,* 2025), sendo sua principal fonte de subsistência. Além de ser uma produção em baixa escala, sofre também com os impactos de solos com baixa fertilidade, principalmente em nitrogênio e fósforo. A utilização de adubos nitrogenados, pode contribuir aumentando a produtividade do feijoeiro, já que disponibiliza esses nutrientes auxiliando na fotossíntese e outros processos metabólicos da planta, porém pode ocasionar a contaminação de recursos naturais, desequilibrando a saúde do solo, a qualidade da água e aumentando os gases de efeito estufa (Agbodjato; Babalola, 2024).

Diante dessas circunstâncias, a busca por alternativas mais sustentáveis na agricultura torna-se urgente, devido ao uso excessivo desses fertilizantes nitrogenados, tornando imperativo explorar métodos agrícolas que promovam a produtividade de forma ecologicamente equilibrada e socialmente responsável. Sendo assim, medidas mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente, como por exemplo, o uso de microrganismos que beneficiem o desenvolvimento das plantas (Khan *et al.,* 2020; Rossetim *et al.,* 2025), são práticas que devem ser empregadas.

Bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) são microrganismos que vivem livremente no solo ou colonizam a rizosfera, e estabelecem uma relação positiva com plantas. Em função disso, podem estimular a produção de fitohormônios, disponibilizar nutrientes e auxiliar no aumento de tolerância aos estresses bióticos e abióticos (Ramakrishna *et al.,* 2019). Outra interação benéfica entre planta-bactéria, é que essa simbiose pode promover o crescimento de plantas através do biocontrole de doenças, com a produção de metabólitos microbianos que atuam contra os fitopatógenos (Bibi *et al.,* 2023).

Dentre os fitohormônios produzidos por bactérias que regulam o desenvolvimento vegetal, estão as auxinas em especial o ácido indol-3-acético, que atua no enraizamento e alongamento celular das plantas (Poveda *et al.,* 2021), a produção de sideróforos que são substâncias que se ligam ao hidróxido de ferro fornecendo esse micronutriente para a planta além de diminuir sua disponibilidade no ambiente para fitopatógenos (Lopes *et al.,* 2021), podem também disponibilizar fosfato e potássio que estão indisponíveis para absorção (Lyu *et al.,* 2016) e fixar nitrogênio atmosférico (Moretti *et al.,* 2020).

Dessa forma, a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, como a inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) e a utilização eficaz de microrganismos benéficos, mostra-se essencial para enfrentar os desafios da produção de feijão no Brasil, visto que é uma planta negligenciada, com poucos inoculantes registrados (Andreata *et al.,* 2024) e com baixa eficiência em comparação com a soja.

Um exemplo dessa abordagem é a simbiose entre o feijoeiro e bactérias comumente chamadas de rizóbios, que têm a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico (N_2) e disponibilizá-lo para a planta na forma amoniacal (Lindström; Mousavi, 2020). As bactérias conhecidas como mais eficientes na interação com o feijoeiro pertencem ao

gênero *Rhizobium* como *Rhizobium tropici*, *R. etli*, *R. freirei*, *R. phaseoli* (Martinez-Romero *et al.,* 1991; Segovia *et al.,* 1993; Dall'Agnol *et al.,* 2013; Mercante *et al.,* 2017). Além disso, o feijoeiro é capaz de interagir com bactérias de outros gêneros, tais como *Bradyrhizobium* e *Paraburkholderia*, em níveis variáveis de eficiência (Michiels *et al.,* 1998; Dall´Agnol *et al.,* 2017), e com o gênero *Bacillus* (Korir *et al.,* 2017; Arslan; Bulut, 2023).

É extremamente importante pesquisar novas estirpes de rizóbios nativos, pois estes possuem uma alta capacidade de competitividade com outros microrganismos, inclusive com as estirpes inoculadas, gerando resultados variáveis na inoculação do feijoeiro. Além disso, os rizóbios nativos são uma fonte de recursos genéticos para isolamento de bactérias adaptadas a diversas condições ambientais, tais como tolerância a solos ácidos, estresse hídrico e resistência a altas temperaturas (Denton *et al.,* 2003; Wekesa *et al.,* 2023), o que se torna viável para uma agricultura que priorize a produção de alimentos com mínimo impacto ambiental (Barzallo *et al.,* 2025).

Portanto, o objetivo dessa revisão bibliográfica é evidenciar a importância da prospecção e avaliação de rizobactérias de solos nativos do Paraná, incluindo Unidades de Conservação e áreas agrícolas, que possam auxiliar na produção sustentável do feijoeiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA CULTURA DO FEIJOEIRO

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), é uma das principais fontes tradicionais de alimentação mundial, principalmente para classes de renda mais baixa, pois além de ser fonte de proteínas, minerais, vitaminas e fibras, é uma opção de consumo mais acessível economicamente (Embrapa, 2021). O gênero *Phaseolus* possui cerca de 55 espécies, das quais 5 apresentam potencial agrícola, sendo a *P. vulgaris L*. a mais cultivada no Brasil (Debouck, 1991).

A produção agrícola do feijão *P. vulgaris L.* no Brasil, ocorre na maioria dos estados, principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, mas também tem produção na região do Nordeste e Norte, onde se produz mais da espécie feijão-caupi (*Vigna unguiculata*). Os estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Goiás são os maiores produtores de feijão comum (CONAB, 2024).

A época de semeadura dessa cultura, é dividida nos meses de setembro à novembro, de Janeiro à Março, também chamado de seca ou safrinha e o de outono-inverno, nos meses de Maio à Julho. Nesses meses, algumas interferências ambientais podem afetar a produção, como geadas e secas, necessitando em alguns momentos de irrigações (Embrapa, 2021).

O Brasil se destaca na produção de feijão comum, sendo o terceiro maior produtor de grãos desta cultura (FAO 2021). O estudo realizado por Antolin *et al.* (2021), mostra que até 2050 é estimado um aumento de 44% na produtividade dessa leguminosa, para atender a demanda nutricional do país. Porém, essa pesquisa evidencia um aumento de 1,23 ^{o}C a 2,86 ^{o}C na temperatura para este mesmo ano, o que provavelmente diminuirá a produtividade desta cultura, visto que além do feijão ser uma planta sensível a alterações ambientais, esse incremento de temperatura pode acarretar o abortamento de flores e não formação das vagens e grãos na planta.

Além disso, outra problemática é que o feijão é uma planta promíscua, capaz de reconhecer diferentes fatores de nodulação, o que aumenta a competitividade de rizóbios nativos com bactérias inoculadas. No trabalho de Moura *et al.* (2025), é visto que o feijão-caupi, apresentou em seus nódulos uma grande diversidade genética de bactérias, através da utilização de diferentes tipos de solos dos biomas Pantanal e Cerrado.

Portanto, pesquisas relacionadas a prospecção de bactérias promotoras de crescimento em diferentes tipos de solos, são alternativas viáveis, especialmente para a acultura do feijão. A simbiose de bactérias com plantas, podem aumentar a produção de grãos, e diminuir os impactos ocasionados nas plantas por alterações climáticas e ainda diminuir o uso de fertilizantes nitrogenados, evitando seus custos econômicos e ambientais (Agbodjato; Babalola, 2024).

2.2. RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS (RPCPS)

Ao longo da história evolutiva, as plantas desenvolveram algumas adaptações, que contribuem para a sua sobrevivência. Nesse sentido, elas apresentam interações com microrganismos, que auxiliam na absorção de nutrientes, além de desempenharem papel de proteção contra fitopatógenos (fungos, oomicetos, bactérias, vírus, protozoários e nematóides) e herbívoros (Khan *et al.,* 2020).

Com a busca de uma agricultura mais sustentável, a utilização de bactérias como estimulantes no desenvolvimento das plantas, são alternativas possíveis e viáveis para melhor expressão do potencial genético das plantas. Sabe-se que a rizosfera é uma porção do solo altamente dinâmica, onde o contato de raízes com microrganismos benéficos e patogênicos interagem entre si, através da produção e secreção de substâncias químicas (Zhang *et al.,* 2021)

As plantas liberam exsudados radiculares na rizosfera, sendo estes: açúcares, enzimas, ácidos orgânicos, aminoácidos, que atraem e favorecem o desenvolvimento de bactérias no local, e facilita a interação entre plantas e bactérias. Portanto, existe uma relação simbiótica, visto que as bactérias fornecem nutrientes não disponíveis para as plantas, equilibrando o estresse biótico e abiótico (Ankati; Podile, 2019).

A eficiência da relação entre as rizobactérias e as plantas, dependem intimamente de como essas bactérias colonizam as raízes. Segundo Gray e Smith (2005), existe uma classificação de acordo com a proximidade dessas bactérias com as raízes, sendo as rizobactérias intracelulares as que colonizam o interior das células das raízes, ou nos nódulos em plantas leguminosas. Exemplos de rizobactérias intracelulares são as do gênero *Bradyrhizobium* e *Rhizobium*, conhecidos como rizóbios. Já as rizobactérias extracelulares, são aquelas que colonizam a rizosfera ou os espaços entre as células do córtex da raiz (rizobactérias de vida livre e endofíticas), sendo como exemplo as bactérias do gênero *Azospirillum* sp., *Bacillus* sp., *Burkholderia* sp., *Pseudomonas* sp*. e Serratia* sp*.* As rizobactérias extracelulares, não possuem a capacidade de formar nódulos nas plantas, porém podem auxiliar na disponibilização de nutrientes para as plantas.

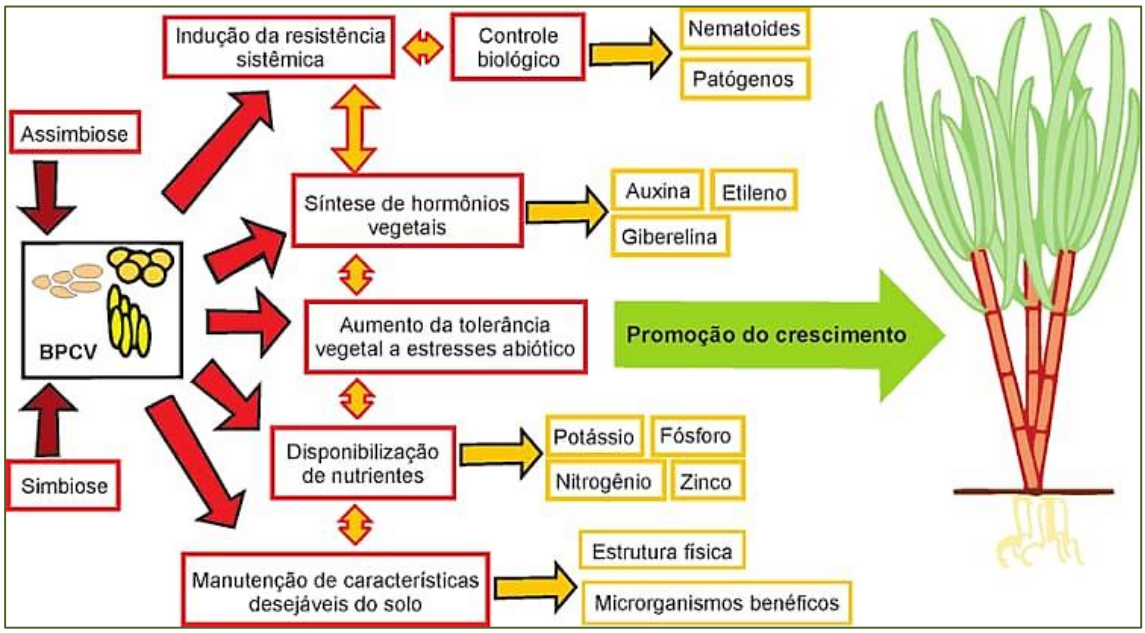
Algumas rizobactérias, possuem a capacidade de sintetizar fosfatos minerais, fornecer ou aumentar a produção de ácido-indolacético, promover a fixação associativa de nitrogênio, produzir sideróforos e outros compostos, auxiliando no desenvolvimento dessas plantas, e por essa razão são caracterizados como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCPs) (Liu *et al.,* 2016; Lopes *et al.,* 2021; Moretti *et al.,* 2020; Poveda *et al.,* 2021).

O grupo das RPCPs, é bastante diversificado, sendo essas bactérias classificadas de acordo com o seu efeito no crescimento vegetal. Dessa forma são classificadas em benéficas, deletérias ou neutras (Dobbelaere *et al.,* 2003; Pereira *et al.,* 2008). As rizobactérias com efeito benéfico, auxiliam na qualidade do crescimento das plantas, além disso podem adaptar-se as diferentes condições climáticas. Por outro lado, as rizobactérias deletérios causam prejuízos às plantas, enquanto as rizobactérias neutras não têm efeito positivo nem negativo. Dessa forma, as bactérias benéficas, são alternativas viáveis para desempenharem funções de proteção contra o estresse biótico e abiótico das culturas (Villavicencio-Pulido *et al.,* 2024).

Além disso, as bactérias promotoras de crescimento vegetal, podem ser classificadas de acordo com a sua funcionalidade: (1) biofertilizantes, auxiliam na disponibilidade de nutrientes para as plantas; (2) fitoestimuladores, estimulam o desenvolvimento da planta, através da produção de hormônios; (3) rizorremediadores, atuam na quebra de moléculas de substâncias poluentes além de selecionar a absorção de alguns metais; (4) biopesticidas: através da produção de metabólicos antifúngicos e a síntese de antibióticos, atuam na proteção da planta contra doenças e patógenos (Novo *et al.,* 2018).

Dentre os principais microrganismos relatados como promotores de crescimento estão os gêneros: *Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas putida, Azospirillum brasilense, Serratia marcescens, Bacillus subtilis, Bacillus megaterium, Rhizobium, Bradyrhizobium, Arthrobacter, Enterobacter, Azotobacter,* entre outras, (Leite *et al.,* 2019; Lin *et al.,* 2018; Longhini *et al.,* 2016; Narayanasamy; Thangappan; Uthandi, 2020; Nascente *et al.,* 2023; Pereira *et al.,* 2019; Silveira *et al.,* 2019; Souza *et al.,* 2019; Zaheer *et al.,* 2019).

Figura 1 Mecanismos de ação das rizobactérias. Compostos bioativos secretados por rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP).



Fonte: Silva *et al.,* 2022 (Adaptado de Maheswari, 2011).

2.3. FIXAÇÃO BIOLÓGICA DO NITROGÊNIO

O Nitrogênio (N), é um macronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, possuindo papel fundamental nos processos fisiológicos como respiração e fotossíntese (Kishorekumar *et al.,* 2020). Dessa forma, em práticas agrícolas, o uso de fertilizantes nitrogenados, acabam sendo muito utilizados, pois oferecem facilmente o N para as plantas. Porém, o seu uso é prejudicial ao meio ambiente, contribuindo para a contaminação da água e do solo, além de emitir gases de efeito estufa (Agbodjato; Babalola, 2024).

Apesar do N compor 80% da atmosfera, não está totalmente disponível para as plantas e microrganismos. Isso deve-se, porque para se tornar disponível precisa apresentar-se como nitrato, amônia e nitrogênio orgânico. A fixação biológica do nitrogênio, realizada pela simbiose entre bactérias diazotróficas e leguminosas, é um processo eficiente, onde esses microrganismos induzem a formação de nódulos, e dentro desses nódulos ocorre o aproveitamento do nitrogênio atmosférico (Rodriguez *et al.,* 2022).

Essas bactérias presentes na rizosfera e nos nódulos radiculares, possuem a enzima nitrogenase funcional, e podem disponibilizar o nitrogênio para as plantas, já que por meio de várias reações de oxidação-redução, cada molécula de nitrogênio é convertida em duas moléculas de amônio, usando oito moléculas de NAD(P)H. O amônio quando solubilizado em água é convertido em hidróxido de amônio, que pode ser assimilado pelas raízes das plantas (Rodriguez *et al.,* 2022).

O processo de fixação biológica do nitrogênio, contribui em média para os diferentes ecossistemas, cerca de 258 milhões de toneladas de nitrogênio por ano. Essa produção, contribui bastante para a agricultura, principalmente para a cultura da soja, que a partir da década de 1960, iniciou o uso de inoculantes contribuindo para o aumento da produção, diminuindo o uso de fertilizantes e de gastos (Costa, 2023). Pesquisas realizadas com as espécies *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*, evidenciaram que a associação dessas bactérias com as raízes da soja, suprem totalmente o N necessário para a plena produção dessa cultura (Hungria *et al.,* 2007).

Na cultura do feijão, o N possui uma importância elevada, pois atua na formação e enchimento dos grãos, garantindo sua produtividade. Por ser uma leguminosa, o feijão possui a capacidade de se associar simbioticamente com bactérias fixadoras de N atmosférico, os rizóbios, pertencentes a família *Rhizobiaceae* (Guo *et al.,* 2023). Pesquisas evidenciam que a associação de bactérias do gênero *Rhizobium tropici* e *R. fleirei* com o feijão, apesar de não suprirem totalmente a demanda de nitrogênio, se mostram muito eficientes e de grande interesse em novas pesquisas, tanto em pequenas propriedades rurais, quanto em propriedades maiores, que visam alta produção (Costa, 2023).

A cultura do feijão, por ser muito negligenciada, em alguns casos tem sido indicado de forma equivocada o uso de inoculantes utilizados na cultura da soja, pois existem poucos inoculantes próprios para a cultura do feijão. Além disso, outros fatores limitantes de avanços com pesquisas de inoculantes de rizóbios em feijão, são os poucos investimentos em melhoramento genético para aperfeiçoar essa simbiose, visto que as estirpes de *Rhizobium* são bastante sensíveis a alterações e estresses ambientais, porém são ótimos formadores de nódulos radiculares (Hungria *et al.,* 2013).

Dessa forma, se faz necessário otimizar a tecnologia de fixação biológica de N da cultura do feijão, selecionando novas estirpes de rizóbios. A inoculação de bactérias

fixadoras de N é uma prática sustentável na agricultura, que, além de promover o aumento da produção das culturas ao fornecer N para o desenvolvimento das plantas, também contribui para melhorar a fertilidade do solo (Timofeeva *et al.,* 2023).

2.4. SOLUBILIZAÇÃO DE POTÁSSIO E FOSFATO

O potássio (K) é um cátion com grande mobilidade nas plantas, sendo um nutriente essencial que desempenha funções importantes no crescimento e desenvolvimento das plantas, como regulação de membrana, fotossíntese, e adaptações a estresse ambiental (Jhonson *et al.,* 2022).

O K pode ser classificado de acordo com Zorb; Senbayram; Peiter (2014), em quatro diferentes grupos, conforme sua disponibilidade para as plantas. Primeiro: como potássio solúvel, disponível para as plantas e microrganismos, porém sujeito a lixiviação. Segundo: como potássio trocável, infiltrado nos argilominerais e coloides orgânicos do solo. Terceiro: potássio não trocável, mantido fortemente por ligações de alta energia à argilominerais ou minerais primários. Quarto, potássio estrutural, incorporado a minerais como feldspato e micas, sendo as micas, pouco disponíveis as plantas.

Essa baixa disponibilidade de K no solo para as plantas, e a distribuição global desse nutriente, explica porque o Brasil é o maior importador de potássio, chegando a comprar em torno de 11,4 milhões de toneladas de cloreto de potássio, no ano de 2020. Esse nutriente é encontrado, principalmente em reservas de rochas chamadas de evaporitos, formados através da evaporação da água do mar, que em condições favoráveis precipitam estes minerais, ou ainda, em ambientes continentais através do contato da água superficial com as rochas, que podem precipitar esses íons na forma de minerais (Motta, 2020). As reservas desse mineral de origem sedimentar, se restringem no Brasil, nos estados do Sergipe e Amazonas. Devido a essa alta dependência do Brasil em fertilizantes, a busca por fontes alternativas de potássio se torna urgentes e necessárias.

O Fósforo (P) é o segundo nutriente mais importante para as plantas, pois atua nas funções fisiológicas, sendo considerado um componente fundamental do DNA, das membranas celulares e do transporte de energia celular das plantas. Porém a maioria dos solos possui deficiência no nutriente P solúvel para as plantas, por isso, necessita-se a utilização de fertilizantes fosfatados, sendo o P um dos nutrientes aplicados em maior quantidade nas culturas (Bouizgarne, 2022). Outro problema, é que o P pode estar presente em elevada quantidade no solo, mas apenas uma pequena parte dos fosfatos fica disponível, a maior parte interage com outras moléculas do solo, como por exemplo os óxidos de ferro, formando complexos insolúveis, levando a necessidade constante de utilização desses fertilizantes (Oliveira *et al.,* 2024).

Já existem estratégias de utilização de fosfatos de rochas (FR) para as culturas, além de buscas por microrganismos solubilizadores de fosfato, que facilitam a disponibilidade desse macronutriente e consequentemente o desenvolvimento dessas culturas de forma não agressiva ao meio ambiente (Azaroual *et al.,* 2020). As bactérias solubilizadoras de P que já foram descritas na literatura são pertencentes aos gêneros: *Bacillus, Pseudomonas, Aeromonas, Agrobacterium, Azotobacter, Bradyrhizobium, Burkholderia, Cyanobacteria, Enterobacter, Erwinia, Kushneria, Micrococcus, Paenibacillus, Rhizobium, Rhodococcus, Salmonella, Serraria, Sinomonas e Thiobacillus* (Bouizgarne, 2022; Kalayu, 2019).

Dessa forma, a atividade bioquímica de RPCV, é uma das alternativas sustentáveis a obtenção do P e K pelas plantas, pois possuem mecanismos facilitadores desse processo, como produção de ácidos orgânicos e liberação de prótons que diminuem o pH do solo e solubilizam esses nutrientes (Kumar; Kumar; Patel, 2018). Importante ressaltar, que a busca por novas estirpes solubilizadoras de fosfato e potássio, devem abranger diferentes locais de coleta de solo, para permitir uma maior diversidade e eficiência desses isolados bacterianos nas diferentes culturas de produção (Oliveira *et al.,* 2024).

2.5. PRODUÇÃO DE ÁCIDO INDOL-3-ACÉTICO

Os fito-hormônios podem ser produzidos por alguns microrganismos, plantas e algas, desempenhando papel fundamental na regulação do crescimento vegetal (Ankati; Podile, 2019). Entre as biomoléculas que podem estimular o desenvolvimento vegetal, estão as fitases e as auxinas. As auxinas são substâncias que estimulam o crescimento das plantas, sendo o ácido indol-3-acético (AIA), produzido principalmente no meristema apical (gema), e na interação planta-bactéria (Afzal *et al.,* 2019).

A principal função desempenhada por essa auxina nas plantas, é no desenvolvimento e alongamento de caule e raízes, através do alongamento de células formadas nos meristemas, auxiliando na absorção radicular e na germinação de sementes (Amin e Latif, 2017). Além disso, está envolvida em inúmeros processos fisiológico das plantas, como indução do sistema de defesa, tolerância a situações de estresse, e regulação do desenvolvimento vegetal (Ali *et al.,* 2024).

Essas auxinas são produzidas por diversos microrganismos, principalmente pelas bactérias promotoras de crescimento do gênero: *Azospirillum*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Burkholderia spp*, *Rhizobium*, *Pseudomonas* e podem ser utilizadas para incrementar o enraizamento e o desenvolvimento vegetal, resultando em maior massa radicular e maior absorção de nutrientes (Amin e Latif, 2017; Arshad *et al.,* 2016; Hussain *et al.,* 2015).

A via metabólica dessa auxina, demostra que o AIA é sintetizado através de diferentes rotas, sendo uma dependente do aminoácido L-triptofano, em que este é convertido em Indol-3-acetamina (IAM) pela ação da enzima Triptofano-2-monooxigenase, e posteriormente convertido a ácido indolacético por meio da ação da enzima IAM-hidrolase, devido os microrganismos possuírem a capacidade de produzir uma conversão oxidativa, na presença do L-triptofano com peroxidases e radicais livres. As vias que não dependem da presença do L-Triptofano para produzir essa auxina, são chamadas de vias independentes de L-Triptofano (Patten e Glick, 2002; Spaepen, Vanderleyden e Remans, 2007).

Microrganismos que possuem a capacidade de produzir hormônios de crescimento vegetal, como por exemplo, o AIA, são classificados como fitoestimuladores (Vejan *et al.,* 2016). Portanto, rizobactérias produtoras dessa auxina, podem estimular o aumento de raízes e aumento foliar, facilitando a absorção de água e nutrientes pela planta (Kang *et al.,* 2019).

Dessa forma, a busca por microrganismos eficientes no crescimento e adaptação das plantas são uma alternativa eficaz para uma agricultura sustentável. A prospecção de bactérias produtoras de AIA, são uma fonte importante para a aplicação na cultura do feijão, pois essas RPCP's atuam no desenvolvimento e crescimento das plantas (Silva *et al.,* 2022).

2.6. PRODUÇÃO DE SIDERÓFOROS

O ferro (Fe) é um micronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, atuando em processos fundamentais como fotossíntese, respiração e síntese de DNA (Puig *et al.,* 2017). Apesar de estar disponível no ambiente para as plantas, nem sempre estão ao alcance dos vegetais, limitando assim a sua produtividade (Briat *et al.,* 2015).

Uma estratégia para minimizar os prejuízos da falta de Fe no desenvolvimento das plantas, *são* as bactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP), que possuem a capacidade de sintetizar sideróforos, que são moléculas que se ligam a diferentes receptores do ferro e são transportados na membrana celular dessas bactérias (Temofeeva *et al.,* 2022).

Os sideróforos, desempenham papel importante na nutrição dessas plantas, além de proteção contra fitopatógenos, pois possuem afinidade com as moléculas de Fe, diminuindo sua disponibilidade e inibindo o desenvolvimento de outros microrganismos (Ji; Gururani; Chun, 2014; Sulochana *et al.,* 2014). Embora sejam quelantes específicos de íons férricos, também é demonstrado que os sideróforos podem se ligar a outros metais, como os metais pesados divalentes, alumínio (Al), cadmio (Cd) e cobre (Cu), formando um composto metal-sideróforos de estabilidade constante (Rajkumar *et al.,* 2010). Com isso, a disponibilidade desses metais pode ser reduzida na rizosfera, diminuindo sua toxicidade para as plantas e os próprios microrganismos (Tank e Saraf, 2009).

Os sideróforos, podem ser classificados em 3 classes: carboxilato, hidroxamato e catecolato, de acordo com suas características estruturais, funcionais e tipos de ligação (Arora; Verma, 2017). São produzidos por diferentes fungos e bactérias, sendo as RPCP uma das principais em produzir sideróforos e melhorar o crescimento das plantas sobre estresse hídrico, pois aumenta os níveis de ferro na planta (Zawadzka *et al.,* 2009).

Os gêneros *Azotobacter, Azospirillum, Bacillus, Dickeya, Enterobacter, Klebsiella, Kasakonia, Methylobacterium, Nocardia, Pantoeae, Paenibacillus, Pseudomonas, Rhodococcus, Serratia*, entre outros, já foram relatados como produtores de sideróforos (Timofeeva *et al.,* 2022). Portanto, é importante a prospecção de novas bactérias produtoras de sideróforos e que sejam adaptadas em solos nativos, para melhor desempenho quando inoculadas nas culturas da região (Yuan et al., 2021).

2.7. IMPORTÂNCIA DA PROSPECÇÃO DE RIZOBACTÉRIAS EM DIFERENTES TIPOS DE SOLOS

O solo constitui um ecossistema complexo e altamente diversificado em termos de microbiota bacteriana, apresentando-se como um substrato privilegiado para o isolamento e caracterização de microrganismos (Fierer, 2017). Estes microrganismos desempenham papéis fundamentais na manutenção das funções dos ecossistemas, auxiliando na ciclagem de nutrientes e determinação da produtividade das culturas (Jansson e Hofmockel, 2020).

A diversidade bacteriana do solo é influenciada por uma variedade de fatores abióticos e bióticos, tais como o pH do solo, a rotação de culturas e o conteúdo de nitrogênio inorgânico, os quais exercem impactos significativos na estrutura e composição desses ecossistemas microbianos (Xiong *et al.,* 2024). Em solos agrícolas, por exemplo, o uso excessivo de fertilizantes químicos, tem contribuído para o aumento do

pH do solo, sendo corrigido com substâncias de alto pH (calagem), o que também modifica as comunidades microbianas do solo (Xiong *et al.,* 2024).

O isolamento de bactérias nativas do solo é de extrema relevância, uma vez que esses microrganismos apresentam elevada capacidade competitiva em relação a outros microrganismos, incluindo estirpes inoculadas, o que pode resultar em variabilidade nos resultados da inoculação. Além disso, as bactérias nativas representam uma valiosa fonte de recursos genéticos, permitindo o isolamento de bactérias adaptadas a condições ambientais específicas, como solos ácidos, estresse hídrico e altas temperaturas (Denton *et al.,* 2003; Wekesa *et al.,* 2023).

Portanto, a investigação de solos oriundos de áreas distintas, tanto preservadas quanto agrícolas, contribui de forma significativa para o avanço do conhecimento acerca da diversidade microbiana, pois fatores como pH, uso do solo, grau de preservação do ambiente e disponibilidade de nutrientes desempenham papéis fundamentais na determinação da composição e da diversidade bacteriana desses ecossistemas (Lauber *et al.,* 2008).

2.8. BIOINSUMOS

O conceito bioinsumos, determinado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa, 2021), é definido como:

> O produto, o processo ou a tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfiram positivamente no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos e de substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos.

Nos últimos anos, devido as consequências da utilização de insumos químicos na qualidade do solo e do meio ambiente, houve um aumento na procura de insumos alternativos, como por exemplo, os inoculantes biológicos produzidos a partir microrganismos benéficos, que além de otimizar o rendimento agrícola, reduz o uso de fertilizantes químicos (Maitra *et al.,* 2021).

Estes inoculantes biológicos são produzidos a partir de microrganismos elites que podem se encaixar em várias funções agronômicas, como por exemplo, induzir a nodulação de plantas leguminosas e auxiliar na fixação biológica de nitrogênio (*Bradhyrizobium sp.*) facilitar a absorção de fosfato e potássio no solo (*Bacillus sp.*) proteger as plantas de agentes estressores (*Bacillus aryabatthai*) e ainda controlar o crescimento de fitopatógenos (*Bacillus thurgiensis*) (Santos, Nogueira e Hungria, 2019).

Desde o início da fabricação desses inoculantes biológicos, as indústrias se preocupam em formular um produto de qualidade, com eficiência e garantia para os produtores. Portanto, uma das preocupações é sobre o carreador desses microrganismos vivos. No Brasil a fabricação desse produto é a base de material turfoso e líquido. A turfa por ser um material constituído de solo orgânico em locais específicos, sendo o Brasil, um país com poucas turfeiras, é utilizada com menos frequência na inoculação de sementes, se aderindo a elas, enquanto os inoculantes líquidos são mais utilizados, podendo ser

aplicados na semente, no sulco, pulverizados no solo ou aplicação foliar (Santos, Nogueira e Hungria, 2019).

A forma de aplicação desses inoculantes nas culturas, interfere diretamente no grau de sua produtividade. Na cultura do feijão, é aplicado tradicionalmente na semente, mas vem crescendo evidências de estudos que mostram que a inoculação diretamente no sulco de semeadura obtém uma população de microrganismos mais bem estabelecida, podendo ocorrer uma nodulação secundária, favorecendo a fixação biológica do nitrogênio e uma maior produtividade (Zilli *et al.,* 2010). Ressaltando que é possível fazer a inoculação de apenas uma cepa de bactéria, ou a coinoculação, que é consórcio microbiano multifuncional, sendo uma abordagem interessante para o avanço da agricultura sustentável (Rossetim *et al.,* 2025).

Portanto, os bioinsumos desempenham um papel central na busca por uma agricultura sustentável e ecologicamente correta, uma vez que a inoculação ou coinoculação desses microrganismos nas culturas auxilia na assimilação e aquisição de nutrientes pelas plantas, melhora a qualidade do solo e reduz os efeitos prejudiciais do uso excessivo de fertilizantes sintéticos no meio ambiente (Maitra *et al.,* 2021; Rossetim *et al.,* 2025).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por práticas agrícolas mais sustentáveis tem sido intensificada nos últimos anos, em resposta aos impactos ambientais causados pelo uso excessivo de fertilizantes químicos. Nesse contexto, o uso de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal surge como uma alternativa promissora, pois além de promover o desenvolvimento das plantas, contribui para a redução da dependência de insumos químicos.

Considerando o crescimento populacional projetado para os próximos anos, o feijão, um dos alimentos mais consumidos globalmente, exige maior atenção em termos de manejo e produção. Contudo, a eficácia dos inoculantes comerciais para o feijão ainda é limitada em comparação com os utilizados para outras leguminosas, como a soja. Isso deve ao fato do feijão apresentar diferentes fatores de nodulação, resultando em uma competição entre as bactérias nativas do solo e as inoculadas.

Diante disso, a prospecção de novos estirpes nativas, especialmente em ecossistemas locais, é crucial para melhorar a eficiência das interações entre rizobactérias e o feijoeiro, com o objetivo de melhorar a produtividade e a sustentabilidade da cultura.

REFERÊNCIAS

[1] AFZAL, I. et al. Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. **Microbiological research,** v. 221, p. 36-49, 2019.

[2] AGBODJATO, N. A.; BABALOLA, O. O. Promoting sustainable agriculture by exploiting plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve maize and cowpea crops. **Peer J**, 12, 2024.

[3] ALI, D. A. et al. A review on mechanisms and prospects of endophytic bacteria in biocontrol of plant pathogenic fungi and their plant growth-promoting activities. **Heliyon**, v.10 (11), 31573, 2024.

[4] AMIN, A.; LATIF, Z. Screening of mercury-resistant and indole-3-acetic acid producing bacterial-consortium for growth promotion of *Cicer arietinum* L. **Journal of Basic Microbiology**, v. 57, n. 3, p. 204-217, 2017

[5] ANDRETA, M. F. L. et al. Microbial Fertilizers: A study on the Current Scenario of Brazilian Inoculants and Future Perspectives. **Plants**, 13 (16), 2246, 2024.

[6] ANKATI, S.; PODILE, A. R. Understanding plant-beneficial microbe interactions for sustainable agriculture. **Journal of Spices & Aromatic Crops**, v. 27, n. 2. p. 93-105, 2019.

[7] ANTOLIN, L. A. S.; HEINEMANN, A. B.; MARIN, F. R. Impact assessment of common bean availability in Brazil under climate change scenarios. **Agricultural Systems**, v. 191, p. 103-174, 2021.

[8] ARAÚJO, T. G. F. et al. Soil and climatic conditions determine the rhizobia in association with *Phaseolus vulgaris* in southern Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology***,* 2025.

[9] ARORA, N. K.; VERMA, M. Modified microplate method for rapid and efficient estimation of siderophore produced by bacteria. **3 Biotechnology**, v. 7, n. 6, p.381, 2017.

[10] ARSHAD, M. et al. Comparison of rhizospheric bacterial populations and growth promotion of AVP1 transgenic and non-transgenic cotton by bacterial inoculations. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 26, n. 5, p. 1284-1290, 2016.

[11] ARSLAN, M.; BULUT, S. The effects of *Bacillus* ssp. on germination and seedling growth of common bean (*Phaseolus vulgaris*). **Current Trends in Natural Sciences**, 12, 23, 160-166, 2023.

[12] AZAROUAL, S. E. et al. Role of inorganic phosphate solubilizing *Bacilli* isolated from Moroccan phosphate rock mine and rhizosphere soils in wheat (*Triticum aestivum* L.) phosphorus uptake. **Current Microbiology**, 77, 2391–2404, 2020.

[13] BIBI, A. et al. Isolation and evaluation of Qatari soil rhizobacteria for antagonistic potential against phytopathogens and growth promotion in tomato plants. **Scientific Reports***,* 13, p. 22050, 2023.

[14] BOUIZGARNE, B. et al. Phosphate and potash solubilizing bacteria from Moroccan phosphate mine showing antagonism to bacterial canker agent and inducing effective tomato growth promotion. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 14, p. 970382, 2023.

[15] BRIAT, J. F., DUBOS, C. E GAYMARD, F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 1, p. 33-40, 2015.

[16] CONAB. Monitoramento agrícola- Safra 2024/2025. Acompanhamento da safra Brasileira de Grãos. Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/Ebook_BoletimZdeZSafrasZZ4Zlevantamento_1%20(1).pdf Acesso em: 22 jan. 2025.

[17] COSTA, M. M. M. N. Fixação biológica de Nitrogênio: uma revisão, 2023. Documento 293 Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1162060/1/FIXACAO-BIOLOGICA-REVISAO.pdf

[18] DALL'AGNOL, R. F. et al. *Rhizobium freirei* sp. nov., a symbiont of *Phaseolus vulgaris* that is very effective at fixing nitrogen. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 63, p. 4167-4173, 2013.

[19] DEBOUCK, D. G. Systematics and morphology. In: Van Schoonhoven, A.; Voysest, O. (eds.) Common beans: research for crop improvement. Cali: CIAT, 1991. p. 55-181.

[20] DENTON, M. D. et al. Competitive abilities of common field isolates and a commercial strain of *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* for clover nodule occupancy. Soil Biology and Biochemistry*,* v. 2003, n. *35*, p. 1039–1048, 2003.

[21] **EMBRAPA.** Sistema de produção de feijão - 2. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1142446/1/Doc-384.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

[22] EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Embrapa Solos, 1999. 412p.

[23] FAO (2021). Bancos de dados e software: Informações sobre culturas, feijão (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação). Disponível em: http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/bean/en/

[24] FIERER N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil Microbiome. ***Nature Reviews Microbiology,*** v. 15, p. 579–590, 2017.

[25] GRANIZO, D. G. B. S. et al. Enhancing turnip cultivation with plant growth-promoting bacteria in organic fertilizer. **Caatinga**, v. 38, p. 12843, 2025.

[26] GRAY, E. J.; SMITH, D. L. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. **Soil biology and biochemistry**, v. 37, n. 3, p. 395-412, 2005.

[27] GUO, K. et al. Biological nitrogen fixation in cereal crops: Progress, strategies, and perspectives. **Plant Communications**, v. 4, (2), 100499, 2023.

[28] HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Embrapa Soja. Documentos, 283). Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/bolpd283soja.pdf

[29] HUNGRIA, M.; MENDES, I. C.; MERCANTE, F. M. Tecnologia de fixação biológica do nitrogênio com o feijoeiro: viabilidade em pequenas propriedades familiares e em propriedades tecnificadas. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 32 p. (Embrapa Soja. Documentos, 338). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/964425

[30] HUSSAIN, A. et al. Effect of IAA on in vitro growth and colonization of Nostoc in plant roots. **Frontiers of Plant Science**, v. 6, p. 46, 2015.

[31] JANSSON, J. K.; HOFMOCKEL, K. S. Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology,** v.18, p. 35–46, 2020.

[32] JI, S. H.; GURURANI, M. A.; CHUN, S. C. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic diazotrophic bacteria from Korean rice cultivars. **Microbiological Research, Germany**, v. 169, n. 1, p. 83-98, 2014.

[33] JOHNSON, R. et al. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry,** v.1, n.172, p. 56-69, 2022.

[34] KALAYU G. Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, 4917256, 2019.

[35] KANG, S. M. et al. Integrated phytohormone production by the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus tequilensis* SSB07 induced thermotolerance in soybean. **Journal of Plant Interactions**, v.14, n.1, p. 416-423, 2019.

[36] KHAN, A. et al. Applications of beneficial plant growth promoting rhizobacteria and mycorrhizae in rhizosphere and plant growth: A review. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, n. 5, p. 199, 2020.

[37]]KISHOREKUMAR, R. et al. An Overview of Important Enzymes Involved in Nitrogen Assimilation of Plants. In: Gupta, K. (eds) Nitrogen Metabolism in Plants. **Métodos em Biologia Molecular**, v. 2057, 2020.

[38] KORIR, H. et al. Co-inoculation Effect of Rhizobia and Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Common Bean Growth in a Low Phosphorus Soil. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n.141, 2017.

[39] KUMAR, A.; KUMAR A.; PATEL H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v.7, n. 5, 1p. 344-1347, 2018.

[40] LAUBER, C. L. et al. Pyrosequencing-Based Assessment of Soil pH as a Predictor of Soil Bacterial Community Structure at the Continental Scale**. Applied and Environmental Microbiology**, v.75, 2009.

[41] LEITE, R. C. et al. Productivity increase, reduction of nitrogen fertilizer use and drought-stress mitigation by inoculation of Marandu grass (*Urochloa brizantha*) with *Azospirillum brasilense*. **Crop & Pasture Science**, v. 70, n. 1, p. 61-67, 2019.

[42] LIN, Y. et al. Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Corn Growth Under Different Fertility Sources. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 10, p. 1239–1255, 2018.

[43] LINDSTRÖM, K.; MOUSAVI, S. A. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. **Microbial Biotechnology**, v.13, n. 5, p. 1314–1335, 2020.

[44] LIU, Y. et al. Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1939-1939, 2016.

[45] LONGHINI, V. Z. et al. Inoculation of diazotrophic bacteria and nitrogen fertilization in topdressing in irrigated corn. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 2, p. 338-347, 2016.

[46] LOPES, M. J. S. et al. Microbial biotechnology: inoculation, mechanisms of action and benefits to plants. **Research in Social Development**, v.10, n.12, 2021.

[47] MAITRA, S. et al. Bioinoculants-Natural Biological Resources for Sustainable Plant Production. **Microorganisms**, v. 10, n. 1, p. 51, 2021.

[48] MAPA. Conceitos. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos. Acesso em: 09 nov. 2021.

[49] MARTINEZ-ROMERO, E. et al. *Rhizobium tropici*, a novel species nodulating *Phaseolus vulgaris* L. beans and *Leucaena* sp. *trees*. **International Journal of Systematic Bacteriology**, v. 41, n. 3, p. 417- 426, 1991.

[50] MERCANTE, F. M.; OTSUBO, A. A.; BRITO, O. R. New native rhizobia strains for inoculation of common bean in the Brazilian savanna. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-11, 2017.

[51] MICHIELS, J. et al. *Phaseolus vulgaris* is a non-selective host for nodulation. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 26, n. 3, p. 193-205, 1998.

[52] MORETTI, L. G. et al. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. **Agronomy Journal**, v.112, n.1, p. 418-428, 2020.

[53] MOTTA. M. B. (org.). Avaliação do potencial de potássio no Brasil: área Bacia do Amazonas, setor centro-oeste, estados do Amazonas e Pará. Manaus: CPRM, 2020. 124 p. (Insumos Minerais para Agricultura, 23). Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21740. Acesso em: 10 jul. 2024.

[54] MOURA, F.T. et al. Unveiling remarkable bacterial diversity trapped by cowpea (*Vigna unguiculata*) nodules inoculated with soils from indigenous lands in Central-Western Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology,** 2025.

[55] NARAYANASAMY, S.; THANGAPPAN, S.; UTHANDI, S. Plant growth-promoting *Bacillus* sp. cahoots moisture stress alleviation in rice genotypes by triggering antioxidant defense system. **Microbiological Research**, v. 239, p. 126518, 2020.

[56] NASCENTE, A. S. et al. Effect of one or more microorganisms on the yield components of upland rice under greenhouse conditions. **Journal of Environmental Science and Health**, v.58, n. 13, p. 991–1000, 2023.

[57] NOVO, L. A. B. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria-assisted phytoremediation of mine soils. **Bio-geotechnologies for Mine Site Rehabilitation**, v.16, p.281–295, 2018.

[58] OLIVEIRA, J. A. et al. Bioprospecting phosphate-solubilizing bactéria in soils with diferente fertility levels. **Semina: Ciências Agrárias**, v.45, p. 271-286, 2024.

[59] PATTEN, C. L.; GLICK, B. R. Regulation of indoleacetic acid production in *Pseudomonas putida* GR12-2 by tryptophan and the stationary-phase sigma factor RpoS. **Canadian journal of microbiology**, v. 48, n. 7, p. 635–642, 2002.

[60] PEREIRA, W. et al. Productivity as a Function of Nitrogen Fertilization and Inoculation with Diazotrophic Plant Growth-Promoting Bacteria. **Sugar Tech**, v. 21, 71–82, 2019.

[61] POVEDA, J. et al. Endophytic fungi as direct plant growth promoters for sustainable agricultural production. **Symbiosis**, v. 85, n. 1, p. 1-19, 2021

[62] PUIG, S. et al. The elemental role of iron in DNA synthesis and repair. **Metallomics**, v. 9, n.11, p. 1483-1500, 2017.

[63] RAJKUMAR, M. et al. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. **Trends in Biotechnology,** v. 28, n. 3, p. 142-149, 2010.

[64] RAMAKRISHNA, W., YADAV, R., E LI, K. Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v.138, p. 10-18, 2019.

[65] RODRIGUEZ, A. C. et al. Simple and sensitive spectrophotometric method for estimating the nitrogen-fixing capacity of bacterial cultures. **MethodsX**, v.9, 1-5, 2022.

[66] ROSSETIM, M. F. T. et al. Enhancing Soybean Yield Through Inoculation of Multifunctional Microbial Consortia. **International Journal of Agronomy**, 2025.

[67] SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v.9, p. 205, 2019.

[68] SEGOVIA, L.; YOUNG, J. P. W.; MARTINEZ-ROMERO, E. Reclassification of American *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli type I strains as *Rhizobium etli* sp. nov. **International Journal of Systematic Bacteriology**, v. 43, n. 2, p. 374-377, 1993.

[69] SILVA, M. A. et al. Rizobactérias multifuncionais: utilização na agricultura. **Research, Society and Development,** v. 11, n. 4, p. 3111426971, 2022.

[70] SILVA, M. S. R., TAVARES, O. C. H., DE OLIVEIRA, I. S. R, et al. Stimulatory effects of defective and effective 3-indoleacetic acid-producing bacterial strains on rice in an advanced stage of its vegetative. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 53, p. 281–288 2022.

[71] SILVEIRA, A. P. D. et al. Exploitation of new endophytic bacteria and their ability to promote sugarcane growth and nitrogen nutrition. **Antonie van Leeuwenhoek**, v.112, p. 283–295, 2019.

[72] SOUZA, E. M. et al. Does the nitrogen application associated with Azospirillum brasilense inoculation influence corn nutrition and yield? **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 53-59, 2019.

[73] SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J.; REMANS, R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, n. 4, p. 425–448, 2007.

[74] SULOCHANA, M. B. et al. Siderophore as a potential plant growthpromoting agent produced by *Pseudomonas aeruginosa* JAS-25. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 174, n. 1, p. 297-308, 2014.

[75] TANK, N.; E SAARAF, M. Enhancement of plant growth and decontamination of nickel-spiked soil using PGPR. **Journal of Basic Microbiology**, v. 49, p.195–204, 2009.

[76] TIMOFEEVA, A. M., GALYAMOVA, M. R., E SEDYKH, S. E. Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. **Plants**, v. 11, n. 22, p. 3065, 2022.

[77] VEJAN, P. et al. Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability. A. Review. **Molecules**, v. 21, n. 5, p. 673-693, 2016.

[78] VILLAVICENCIO-PULIDO, J. G., ROBLES-SÁMANO, R., TAPIA-SANTOS, B. Sustainable scenarios in a plants–rhizobacteria–plant consumers system are in risk when biotic or abiotic factors change. **Mathematical Biosciences**, v. 375, p. 109261, 2024.

[79] WEKESA C. et al. Molecular Characterization of Indigenous *Rhizobia* from Kenyan Soils Nodulating with Common Beans. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n.11, p. 9509, 2023.

[80] XIONG, R. et al. Soil pH amendment alters the abundance, diversity, and composition of microbial communities in two contrasting agricultural soils. **Microbiology Spectrum,** v.12, n. 8, p. 04165-23, 2024.

[81] YEKEN, M. Z. et al. Assessment of Mineral Content Variations for Biofortification of the Bean Seed. **International Journal of Agriculture and Wildlife Science**, v. 4, n. 2, p. 261–269, 2018.

[82] YUAN, M. M. et al. Climate warming enhances microbial network complexity and stability. **Nature Climate Change**, v.11, p. 343-348, 2021.

[83] ZAHEER, M. S. et al. Investigating the effect of *Azospirillum brasilense* and *Rhizobium pisi* on agronomic traits of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n.11, p. 1554–1564, 2019.

[84] ZHANG, J. et al. Harnessing the plant microbiome to promote the growth of agricultural crops. **Microbiological Research**, p. 245:126690, 2021.

[85] ZAWADZKA, A. M. et al. Siderophore-mediated iron acquisition systems in *Bacillus cereus*: identification of receptors for anthrax virulence associated petrobactin. **Biochemistry**, v. 48, p. 3645-3657, 2009.

[86] ZILLI, J. E. et al. Inoculação da soja com *Bradyrhizobium* no sulco de semeadura alternativamente à inoculação de sementes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1875-1881, 2010.

[87] ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture: status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 656-669, 2014.

Capítulo 6

Biochar: aplicações na remediação ambiental e no sequestro de carbono

Andressa Luiza Machado dos Santos[1]
Mayara Gomes Tomassoni[2]
Alice Jacobus de Moraes[3]
Camila Vogt dos Santos[4]
Adilson Ricken Schuelter[5]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[6]

Resumo: Biochar é um material carbonizado obtido através de processos como pirólise e gaseificação de biomassa, caracterizado por sua alta porosidade, grande área superficial e capacidade de reter água e nutrientes. Estas propriedades fazem do biochar um recurso valioso para a agricultura sustentável, especialmente em solos degradados, onde contribui para melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo. Além disso, o biochar favorece o desenvolvimento de microrganismos, proporcionando um habitat estável e protegido. Atualmente, é reconhecido pela sua capacidade de modificar a estrutura do solo, melhorar a retenção de água e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, sendo também utilizado em catalisadores e adsorventes. Suas propriedades variam de acordo com a biomassa e as condições de produção, representando uma importante fonte de minerais e nutrientes. Biochar demonstrou grande potencial em aplicações de remediação ambiental, incluindo descontaminação de solos e águas subterrâneas, tratamento de efluentes, sequestro de carbono e captura de gases de efeito estufa. Sua capacidade de adsorção, influenciada por propriedades físico-químicas como área superficial e capacidade de troca catiônica, permite a remoção eficaz de metais pesados e poluentes orgânicos. Além disso, o biochar destaca-se como uma solução econômica e sustentável, aplicável na correção de solos, purificação de água e outras áreas. A eficácia na remoção de contaminantes é influenciada tanto pelo tipo de biomassa utilizada quanto pelas condições de pirólise.

Palavras-chave: Biochar. Sequestro de carbono. Correção de solo.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-4902-0972
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0006-7484-4152
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR.
[4] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0001-7566-8003
[5] Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (UDC)/ Foz do Iguaçu – PR https://orcid.org/0000-0002-5545-7601
[6] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

O biochar é um material carbonizado produzido pela pirólise, gaseificação, torrefação e carbonização hidrotérmica da biomassa de resíduos agrícolas, biomassa de algas, resíduos florestais, adubos, lodos ativados, culturas energéticas, digestatos, entre outros. Suas características incluem alta porosidade, grande área de superfície e capacidade de retenção de água e nutrientes. Esses atributos tornam o biochar uma ferramenta eficaz na agricultura sustentável, utilizado principalmente no solo para melhorar suas propriedades físicas, químicas e biológicas, especialmente em solos pobres ou degradados (Weber; Quicker, 2018).

Além disso, o biochar pode ter um impacto significativo nas comunidades microbianas do solo. Ele atua como habitat para microrganismos, promovendo sua sobrevivência e atividade. A alta porosidade e a estabilidade do biochar fornecem um ambiente físico favorável para o crescimento microbiano, enquanto sua capacidade de adsorção pode proteger os microrganismos de substâncias tóxicas e melhorar a disponibilidade de nutrientes (Bolan *et al.*, 2023).

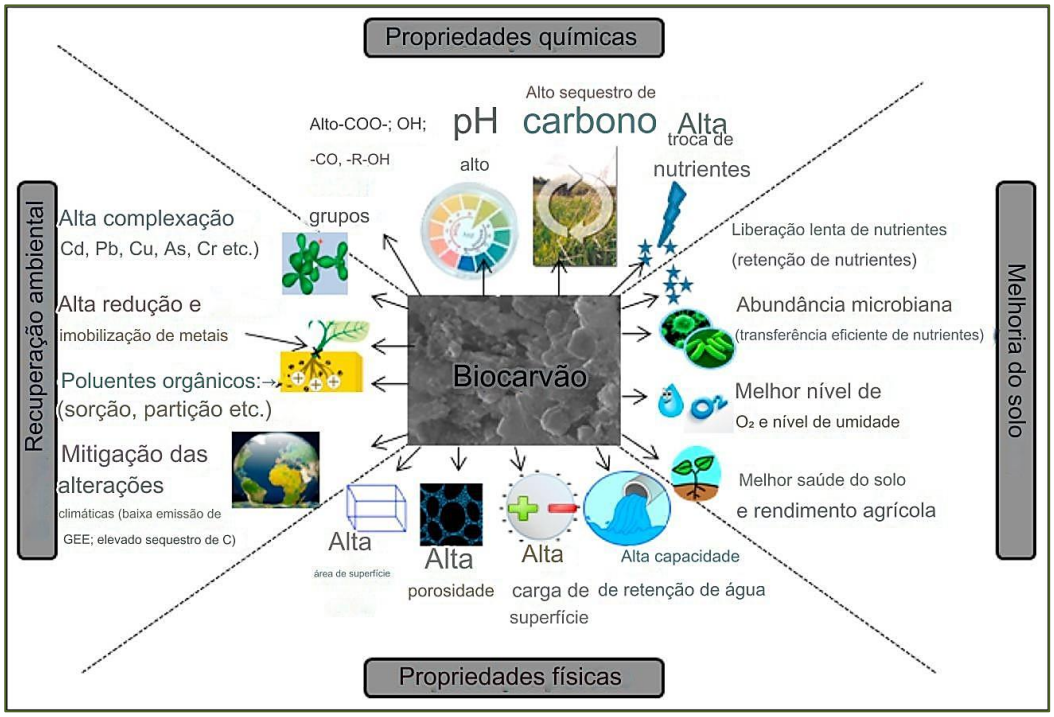
O biochar foi inicialmente identificado na região da Bacia Amazônica, na América do Sul, onde povos indígenas o produziam ao empilhar toras de madeira em poços e queimá-las lentamente, sem a presença de oxigênio, durante os estágios iniciais da civilização (Thines *et al.*, 2017). Esses solos, conhecidos por sua coloração escura, eram ricos em cálcio, nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica, fatores que impulsionavam a produtividade agrícola. A adição de carvão ao solo tinha o objetivo de melhorar a capacidade de retenção de nutrientes e promover o crescimento das culturas. Solos semelhantes, como o "terra preta", também foram encontrados em outras regiões, incluindo o Equador, Peru e África Ocidental (Thines *et al.*, 2017).

A incorporação do biochar como aditivo ao solo tem recebido crescente atenção devido ao seu impacto positivo em diversas propriedades. Especificamente, o biochar pode alterar a estrutura, textura, porosidade e distribuição do tamanho das partículas, bem como a densidade do solo, modificando o conteúdo de oxigênio, a capacidade de armazenamento de água e o estado microbiano e nutricional na zona de enraizamento das plantas. Além disso, o biochar tem sido associado a mudanças no pH, condutividade elétrica (CE) e capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (Yan *et al.*, 2016).

O uso do biochar como corretivo do solo também oferece benefícios no combate às mudanças climáticas, pois promove a remoção de CO_2 e reduz as emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Essa abordagem tem sido proposta como uma estratégia global para a mitigação climática e vem sendo amplamente estudada nas últimas décadas (Lehman *et al.*, 2021). Além disso, o biochar tem se popularizado como substituto de materiais à base de carbono fóssil em diversas aplicações, incluindo a fabricação de catalisadores e adsorventes de contaminantes (Qian *et al.*, 2015; Wang; Wang, 2019). Nesse contexto, o uso potencial do biochar em diversas aplicações está diretamente relacionado às suas propriedades químicas e físicas que variam de acordo com a biomassa utilizada na produção e das condições de pirólise. Sendo assim, o biocarvão se distingue de outras formas de matéria orgânica por apresentarem uma maior quantidade de compostos de carbono aromáticos em sua composição química. Além disso, possuem uma fração mineral que inclui macro e micronutrientes, tornando-se uma importante fonte de substâncias minerais, como cálcio, magnésio e carbonatos, para os microrganismos do solo (Zielińska *et al.*, 2015).

Desse modo, os benefícios do biochar afetará: 1) os fluxos de nutrientes do solo que podem diminuir a eutrofização; 2) o estado e a fertilidade do solo, incluindo porosidade, pH, troca iônica e crescimento radicular positivamente, bem como influenciará os processos microbianos; 3) a produtividade, qualidade e fisiologia das plantas ou culturas influenciando positivamente a segurança alimentar e a saúde; 4) remove contaminação do solo; 5) mercados para biomassa e terra positivamente, aumentando a demanda por biomassa levando a mudanças no uso da terra; 6) insumos industriais para setores agrícolas, como agroquímicos, água e maquinário, que serão reduzidos; 7) fornecerá bioenergia e produtos bioquímicos de gases de pirólise e alcatrões (calor, energia, combustível para veículos, lubrificantes); 8) fornecerá serviço de tratamento de resíduos de biomassa (resíduos de jardim, resíduos agrícolas); 9) mercado para fabricação de equipamentos (pirólise) (Yrjälä *et al.*, 2022).

Figura 1 Diversas aplicações do biochar.



Adaptado pela autora baseado em Oliveira *et al.* (2017).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PIRÓLISE

As tecnologias de preparação de biochar geralmente incluem pirólise, carbonização hidrotérmica e gaseificação, que aquecem e carbonizam as matérias-primas de sua superfície externa em um ambiente com oxigênio limitado (Xiang *et al.*, 2022). A pirólise é o processo de decomposição de qualquer matéria-prima rica em carbono em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos convenientes (Parthasarathy *et al.*, 2022). Geralmente, a pirólise é definida como a decomposição química e térmica de um material orgânico a uma temperatura superior a 400˚C na ausência de oxigênio que leva à produção de três substâncias principais: um carvão sólido residual (biochar), um produto

líquido (bio-óleo) e um gás não condensável conhecido como (gás de síntese) que consiste em monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2), hidrogênio (H2) e metano (CH4) (Thines *et al.*, 2017).

Seu produto líquido, o bio-óleo, pode ser utilizado como combustível e lubrificante. O produto gasoso, o gás de síntese, é uma importante matéria-prima química usada para fazer uma variedade de bens industriais (combustíveis para transporte e produtos químicos). A principal vantagem da pirólise é que ela oferece excelente controle sobre esses produtos. Dessa forma, o rendimento e a composição dos produtos de pirólise podem ser facilmente influenciados pela manipulação dos parâmetros operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência sólida, tamanho de partícula e tipo de matéria-prima (Parthasarathy *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a pirólise pode ser dividida em pirólise lenta e pirólise rápida, com base na velocidade de aquecimento e no tempo de permanência. A carbonização convencional, conhecida como pirólise lenta, gera biochar ao aquecer biomassa lentamente por um período prolongado e a uma temperatura moderada (350–550 °C), na ausência de O 2 e resulta em maior rendimento de biochar (30%) do que a pirólise rápida (12%) ou gaseificação (10%) (Inyang; Dickenson, 2015). Ao contrário da pirólise convencional, a pirólise rápida opera com uma alta taxa de aquecimento (acima de 200 K/min) e um curto tempo de residência (menos de 10 segundos). Dessa forma, a principal diferença entre os dois métodos está nos rendimentos de biochar e bio-óleo: enquanto a pirólise rápida favorece um alto rendimento de bio-óleo, a pirólise lenta resulta em um maior rendimento de biochar (Qian *et al.*, 2015).

O processo de pirólise é dividido em estágios primário e secundário. No estádio inicial, o calor é transferido para a partícula por radiação ou convecção, aumentando a temperatura e removendo a umidade. Durante as fases de pré-pirólise e pirólise, os voláteis e o gás de síntese são liberados e fluem pelos poros da partícula. Na segunda etapa, os poros do sólido se expandem devido à conversão da biomassa em gases, criando locais adicionais para as reações dos gases voláteis e de síntese. O calor é transferido por condução dentro da partícula de biomassa, por convecção nos poros da partícula e por convecção e radiação da superfície, completando o processo de pirólise (Thines *et al.*, 2017).

Nesse contexto, especificamente durante a decomposição térmica, a lignina, a celulose, a hemicelulose, a gordura e o amido na matéria-prima são decompostos termicamente, formando três produtos principais: biochar (fração sólida), bio-óleo (matéria volátil parcialmente condensada) e gases não condensáveis (CO, CO2, CH4 e H2) (Thines *et al.*, 2017). Desse modo, o rendimento dos produtos da pirólise varia de acordo com as características da biomassa e os processos de pirólise utilizados (Chan *et al.*, 2016). Além disso, a preparação de biochar por pirólise é fácil e de baixo custo, o que contribui para a sustentabilidade ambiental (Wang; Wang, 2019).

2.2. APLICAÇÃO AMBIENTAL DO BIOCHAR

Em diversos estudos, o biochar tem demonstrado grande potencial para uma variedade de aplicações de remediação verde, como a recuperação de solos e águas subterrâneas, tratamento de águas residuais, sequestro de carbono, gestão de resíduos e captura de gases de efeito estufa (Masud *et al.*, 2023). Sua estrutura altamente porosa, composta por uma rede de microporos, mesoporos e macroporos, oferece uma vasta área

de superfície, o que favorece a adsorção e retenção de contaminantes (Masud *et al.*, 2023). Assim, a adsorção é o principal mecanismo pelo qual o biochar remove metais pesados e poluentes orgânicos. A capacidade de adsorção do biochar está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas, incluindo área de superfície, distribuição do tamanho dos poros, grupos funcionais e capacidade de troca catiônica. Vale ressaltar que essas propriedades físico-químicas podem variar conforme as condições de preparação do biochar.

Em geral, o biochar produzido em alta temperatura apresenta maior área superficial e teor de carbono, principalmente devido ao aumento do volume dos microporos causado pela remoção de compostos orgânicos voláteis em alta temperatura (Wang; Wang, 2019).

A característica mais atraente do biochar é o fato de que ele representa um processo barato, sustentável e de fácil produção, permitindo a produção de materiais com aplicações extensivas a um custo menor em comparação com outros processos químicos. Essas aplicações incluem correção de solo, catálise, purificação de água e armazenamento de energia e gás (Qian *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, têm sido realizados esforços significativos para investigar o uso do biochar na remoção de diversos poluentes orgânicos da água e do solo. Entre os poluentes orgânicos alvo estão os agroquímicos, como pesticidas, herbicidas, fungicidas e inseticidas, incluindo carbofurano, clorpirifós, atrazina, simazina e pirimetanil. Também se incluem antibióticos e drogas, como sulfametazina, sulfametoxazol, tilosina, acetaminofeno, ibuprofeno e tetraciclina, além de produtos químicos industriais, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), incluindo naftaleno, fenantreno, pireno, antraceno, bifenil policlorado, m-dinitrobenzeno, catecol e p-nitrotolueno. Compostos orgânicos voláteis, como tricloroetileno, benzeno, furano, butanol e hexano, bem como corantes aromáticos catiônicos, como rodanina, azul brilhante, violeta de metila e azul de metileno, também são alvos dessa pesquisa. Além disso, o biochar é utilizado para tratar compostos orgânicos presentes em fluxos de resíduos específicos, como compostos estrogênicos em esterco animal e esgoto, compostos inibidores da degradação de biomassa (por exemplo, furfural, hidroximetil furfural, compostos fenólicos) e compostos orgânicos tóxicos encontrados no chorume de aterros sanitários. (Oliveira *et al.*, 2017).

A eficácia do biochar na remoção de contaminantes é fortemente influenciada pela temperatura de pirólise e pelo tipo de matéria-prima utilizada. Quando produzido a temperaturas de pirólise superiores a 500 °C, o biochar geralmente apresenta uma estrutura altamente carbonizada, conferindo diversas vantagens para a adsorção de poluentes orgânicos (Seow *et al.*, 2022). Essas vantagens incluem uma maior área de superfície, uma rede mais desenvolvida de microporos e características como hidrofobicidade, uma relação carbono-nitrogênio (C/N) elevada e um pH equilibrado. Ademais, o biochar obtido a altas temperaturas tende a apresentar baixos níveis de carbono orgânico dissolvido, o que diminui a interferência em sua capacidade de adsorção (Oliveira *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2021).

Além disso, a matéria-prima utilizada na produção de biochar influencia significativamente suas propriedades e eficácia na remoção de contaminantes. Biochars derivados de biomassa lenhosa e resíduos de colheitas tendem a apresentar uma área de superfície maior em comparação com aqueles produzidos a partir de resíduos sólidos municipais e esterco animal, essencialmente quando todos são submetidos a pirólise a altas temperaturas. Outros fatores, como o pH do biochar, o tempo de residência, a taxa

de aplicação e o tipo de contaminante, também influenciam a eficiência de remoção proporcionada pelo biochar. (Oliveira *et al.*, 2017).

2.3. PREPARAÇÃO A PARTIR DE VÁRIAS MATÉRIAS-PRIMAS

Resíduos sólidos, como lodos de esgoto e resíduos agrícolas, são gerados em larga escala globalmente, representando um desafio ambiental e uma oportunidade para soluções sustentáveis. A conversão desses materiais em biochar surge como uma abordagem promissora para o manejo eficiente de resíduos e a promoção da sustentabilidade ambiental (Wang; Wang, 2019). Diversas biomassas, incluindo resíduos agrícolas, fertilizantes orgânicos e lodos de esgoto, podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de biochar, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes contextos.

O biochar destaca-se por suas propriedades únicas, como elevada capacidade de adsorção, alta área superficial específica, microporosidade e significativa capacidade de troca catiônica. A eficiência de suas aplicações ambientais depende diretamente de suas características físico-químicas, que são influenciadas pela natureza da biomassa de origem e pelas condições de pirólise adotadas durante o processo de produção. Esses fatores determinam parâmetros cruciais, como área superficial específica, polaridade, relação atômica, pH e composição elementar, os quais afetam o comportamento adsortivo e as interações químicas na superfície do biochar (Oliveira *et al.*, 2017).

2.4. BIOCHAR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os resíduos agrícolas são geralmente queimados ao ar livre e em condições descontroladas. Isso resulta em problemas ambientais, como poluição do solo, da água e do ar. As grandes quantidades de subprodutos agrícolas, como palha e casca de cereais, bagaço e galhos de árvores, podem se tornar recursos em vez de resíduos que agora são mais frequentemente queimados no local, contribuindo para a poluição do ar nas regiões (Yrjälä *et al.*, 2022). Assim, os resíduos agrícolas gerados como subprodutos da produção agrícola são amplamente utilizados para a preparação do biochar (Enaime; Lubken, 2021).

O biochar de resíduos agrícolas tem ganhado cada vez mais atenção recentemente no campo energético devido à sua sustentabilidade, baixo custo, além de ter alto desempenho de supercapacitância. Além disso, tem uma ampla gama de aplicações ambientais, incluindo tratamento de águas residuais, melhoria da fertilidade do solo, imobilização de contaminantes e sequestro de carbono *in situ* (Khedulkar *et al.*, 2023). Desse modo, o biochar de resíduos agrícolas pode ser usado como um material cimentício sem nenhum efeito prejudicial ao meio ambiente em vez de cinzas de resíduos agrícolas (Zeidabadi *et al.*, 2018).

2.5. BIOCHAR DE RESÍDUOS FLORESTAIS

A exploração intensiva de madeira, juntamente com a contenção de incêndios, tem originado áreas florestais compostas em grande parte por árvores de menor diâmetro, que são mais suscetíveis a incêndios severos (Puettmann *et al.*, 2020). Como resultado, os incêndios florestais estão se tornando mais frequentes e intensos devido ao acúmulo de material combustível nas florestas e à ocorrência de longos períodos de seca (Sahoo *et al.*,

2021). Assim, os resíduos gerados pelo manejo florestal ou pela extração de madeira nas práticas comerciais constituem um risco de incêndio que deve ser devidamente eliminado ou tratado. Contudo, esses resíduos florestais podem ser utilizados de forma eficaz para gerar produtos valiosos de origem biológica, como bioenergia e biochar (Sahoo *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a produção de biochar proveniente de resíduos florestais pode atuar como uma abordagem multifacetada para mitigar ameaças globais, como a ocorrência de incêndios florestais, ao reduzir o excesso de biomassa na floresta. Além disso, contribui para a mitigação das mudanças climáticas ao capturar e armazenar carbono no solo através de sua aplicação na agricultura. Essa prática não só aumenta a produtividade das culturas, mas também melhora a qualidade do solo, resultando em menor necessidade de fertilizantes e irrigação (Sahoo *et al.*, 2021). Ademais, o uso de biochar originado de resíduos agrícolas e florestais traz diversas vantagens, como alta disponibilidade, baixo custo e facilidade de fabricação. Notavelmente, o biochar exibe capacidade de adsorção eficiente para poluentes, incluindo metais pesados, nitrogênio, fósforo e antibióticos (Yu *et al.*, 2024).

Para promover a utilização de recursos, por exemplo, sabugos de milho, palha de soja, cascas de amendoim, palha de arroz, cascas de grãos, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros, podem ser convertidos em adsorventes e catalisadores (Yu *et al.*, 2024). Além disso, o biochar derivado de resíduos agrícolas e florestais contém substâncias ativas como pectina, celulose, hemicelulose e lignina, que lhe permitem reagir com vários íons de metais pesados.

2.6. BIOCHAR DE RESÍDUOS DO AÇAÍ

O cultivo do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) como fonte de alimento para ou para fins comerciais possui alta representatividade econômica na Amazônia brasileira (Sato *et al*., 2020). Além do consumo in natura, os produtos obtidos do fruto do açaí são utilizados em indústrias alimentícias e como pigmento corante natural. No entanto, tal progresso tem sido acompanhado pelo crescimento da geração de resíduos indesejados do processamento (sementes e fibras), muitas vezes descartados de forma inadequada, impactando a paisagem natural e entupindo esgotos e cursos d'água. Desse modo, os resíduos de seu processamento estão se tornando problemas ambientais locais, resultando em aproximadamente 80 t de resíduos para cada 100 t de fruto (Sato *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2023).

Para enfrentar os problemas ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos, têm sido explorados diversos usos alternativos, como o reaproveitamento em artesanato, a utilização em energia renovável, a produção de rações para animais e a aplicação como fertilizantes para solos (Sato *et al.*, 2020; Mendonça *et al.*, 2024). Nesse contexto, a produção de biochar emerge como uma solução eficaz e sustentável.

Biomassas residuais de frutas amazônicas como açaí, cupuaçu, tucumã e castanha do Brasil têm sido utilizadas para a produção de adsorventes em processos de adsorção (Feitoza *et al.,* 2022). Desse modo, a aplicação do biochar a partir de resíduo de semente de açaí é exemplificada por Feitoza *et al.* (2022) empregado como um adsorvente para remover catecol. Outras investigações também demonstraram a eficácia de biochar proveniente da semente do açaí, incluindo a pesquisa de Mendonça *et al.* (2024), que destacam seu papel como condicionador de solo e fertilizante na produção de mudas da

pimenta-do-reino. Esses estudos evidenciam que os resíduos de açaí são uma biomassa altamente eficaz para a produção de biochar, que pode ser utilizado de maneira eficiente em diversas aplicações.

2.7. BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO

Ao longo das últimas duas décadas, foram implementadas políticas voltadas para a minimização e a reutilização, visando a diminuição da quantidade de resíduos gerados e a adoção de novas estratégias para a gestão de resíduos, a fim de reduzir os impactos ambientais (Goldan *et al.*, 2022). A recuperação de materiais através de técnicas de *upcycling* (reutilização de resíduos de forma a criar um produto de maior qualidade ou valor do que o original) e reciclagem tem vantagens diretas (principalmente matérias-primas e secundárias) (Goldan *et al.*, 2022). Desse modo, os resíduos orgânicos são produtos secundários originados das atividades agrícolas, industriais ou urbanas, são denominados "resíduos" por não serem produtos primários (Goldan *et al.*, 2022).

Dentro desse cenário, o lodo de esgoto é um resíduo semissólido gerado como subproduto no processo de tratamento de águas residuais, sejam elas municipais ou industriais (Singh *et al.*, 2020). Esse lodo precisa ser tratado e descartado, pois uma variedade de substâncias, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo metais pesados, patógenos e poluentes (Wang; Wang 2019; Rangabhashiyam *et al.*, 2021).

A biomassa do lodo de esgoto frequentemente é composta por celulose, lignina e minerais, apresentando carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre como seus principais componentes. Além disso, esse material inclui nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e oligoelementos essenciais (Singh *et al.*, 2020). Na maioria dos casos, os principais poluentes presentes no lodo de esgoto incluem HAPs e elementos potencialmente tóxicos (EPTs), metais pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb), micropoluentes (microplásticos) e patógenos bacterianos humanos (HBPs), que têm efeitos graves e desconhecidos em diferentes ecossistemas (Racek *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2020).

Portanto, o lodo é uma mistura heterogênea que combina compostos benéficos e prejudiciais, além de matéria orgânica, macronutrientes e micronutrientes. As alternativas para o descarte deste material incluem: aterros sanitários (14%), incineração (27%), aplicações em cultivo agrícola (42%) e outros setores industriais (17%), que podem englobar a recuperação de energia e processos de adsorção (Singh *et al.*, 2020). Contudo, o lodo surge como uma matéria-prima promissora para a produção de biochar, visto que é abundante em carbono e nutrientes como a amônia. O biochar oferece benefícios próprios, como elevado teor de carbono, significativa capacidade de troca catiônica, grande área de superfície e uma estrutura estável (Wang, Wang, 2019).

Sendo assim, o biochar obtido pela pirólise do lodo de esgoto, oferece benefícios significativos, incluindo a melhoria das propriedades do solo, aumento da retenção de água e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, contribui para a gestão de resíduos e a recuperação de nutrientes essenciais. No entanto, o uso do biochar enfrenta desafios, como elevados custos de produção, variabilidade na qualidade do produto e preocupações regulatórias relacionadas à presença de contaminantes no lodo de esgoto. O biochar tem um potencial substancial para promover práticas ambientais sustentáveis, desde que sejam superados os desafios técnicos e econômicos associados à sua produção e uso (Khan *et al.*, 2023).

2.8. BIOCHAR NA MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para atingir a meta do Acordo de Paris de emissões líquidas zero, a mitigação eficaz das mudanças climáticas requer tanto reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) quanto a retirada de dióxido de carbono atmosférico (CO2). Desse modo, o uso de biochar como um corretivo do solo para reduzir as emissões de GEE e remoção de CO 2 (CDR) foi proposto como uma estratégia global para mitigação das mudanças climáticas e tem sido intensamente estudado na última década (Lehman *et al.*, 2021).

Dessa forma, o uso de biochar como um aditivo ao solo resulta na mitigação das emissões de gases de efeito estufa diretamente pelo sequestro de carbono sólido no solo por centenas ou mesmo milhares de anos, e indiretamente pela melhoria da fertilidade do solo e da saúde geral do solo (Qian *et al.*, 2015). O sequestro de carbono refere-se ao processo pelo qual o carbono é retido e armazenado em forma estável e inerte em um sumidouro, em vez de ser emitido para a atmosfera. Desse modo, a estabilidade do biochar confere-lhe a capacidade de sequestrar carbono por períodos prolongados. Portanto, o armazenamento de pequenas quantidades de carbono no solo através do biochar pode reduzir significativamente as emissões de GEE (Arif *et al.*, 2020).

Os efeitos da mitigação das mudanças climáticas proporcionados pelo biochar são influenciados não apenas por suas propriedades intrínsecas, mas também pelas emissões de gases de efeito estufa associadas à sua produção e aplicação ao longo de todo o ciclo de vida. Desse modo, existe uma distinção importante entre a redução das emissões CO_2, N_2O, CH_4 e fuligem, e o sequestro de CO_2 da atmosfera. Os sistemas de biochar podem impactar tanto as emissões de GEE quanto o sequestro de carbono por meio de três mecanismos principais: (1) redução da mineralização do carbono e das emissões não-CO_2 do próprio biochar em comparação com a biomassa não pirolisada; (2) emissões associadas à conversão termoquímica da biomassa e emissões evitadas de combustíveis fósseis, caso a energia gerada seja produzida com captura e armazenamento de carbono; e (3) alterações nas emissões de GEE após a aplicação do biochar no solo, que incluem o aumento do crescimento das plantas (resultando em maior armazenamento de carbono na vegetação), menores emissões de GEE não-CO_2 do solo e redução da mineralização da matéria orgânica do solo (Lehman *et al.*, 2021).

Desse modo, a melhoria da fertilidade do solo estimula o crescimento das plantas, o que leva ao consumo adicional de CO_2. A melhoria da fertilidade do solo também reduz a necessidade de entrada de fertilizantes e, portanto, reduz as emissões de carbono durante a produção, transporte e aplicação de fertilizantes (Qian *et al.*, 2015).

Sendo assim, entre as funções ecológicas mais relevantes do biochar estão seu papel como sumidouro de carbono de longo prazo para a mitigação das mudanças climáticas. Além de sequestrar carbono, o biochar contribui também para a redução das emissões de GEE, incluindo amônia e óxido nitroso. Portanto, a adição de biochar demonstra ser ecologicamente benéfica e possui valor econômico potencial ao melhorar a produtividade agrícola, conservar a qualidade da água e reduzir as emissões de GEE. Desse modo, a característica mais notável do biochar é sua capacidade de sequestrar carbono no solo por períodos prolongados (Rashid *et al.*, 2020).

2.9. RECUPERAÇÃO E MELHORIA DO SOLO E DESCONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS COM BIOCHAR E MICRORGANISMOS

As populações microbianas do solo desempenham um papel primordial na decomposição de substâncias orgânicas, na fixação de nitrogênio e no ciclo de nutrientes. Dessa forma, as populações microbianas do solo são influenciadas pelo biochar, que altera as propriedades químicas e físicas do solo, como pH, disponibilidade de nutrientes e capacidade de retenção de água. O biochar oferece um substrato que facilita a colonização microbiana, cria habitats para diversos microrganismos e os protege contra dessecação e predação (Enaime; Lubken, 2021).

Dessa forma, o biochar é comumente utilizado para a melhoria do solo, com o objetivo de potencializar suas propriedades físico-químicas e as atividades biológicas nas terras agrícolas, além de contribuir para a mitigação de problemas ambientais ao eliminar poluentes do solo e da água (Qian *et al.*, 2015; Gorovtsov *et al.*, 2020).

A aplicação do biochar com inoculação de microrganismos na agricultura é exemplificada por Sifton; Smith; Thomas (2023) e Rafique *et al.* (2017), com a inoculação de *Lysinibacillus fusiformis* (31MZR), uma bactéria solubilizadora de fósforo (BSP), na avaliação do crescimento e estado nutricional do milho. O estudo destaca a cepa 31MZR de *Lysinibacillus fusiformis*, que, quando inoculada, resultou em aumentos significativos nos teores de nitrogênio (32,8%), fósforo (72,5%) e potássio (42,1%) nas plantas. Tanto o biochar quanto as BSPs apresentam potencial para servir como emendas eficazes na agricultura, oferecendo uma alternativa promissora para aprimorar o crescimento. Nessa mesma linha de pesquisa, Sifton; Smith; Thomas (2023), avaliaram os efeitos de dois tipos de biochar de madeira com *Bacillus velezensis* e um biofertilizante de levedura inativada (IY) em um experimento com mudas de *Acer saccharinum* L. (bordo prateado). Todos os tratamentos que combinavam biochar e biofertilizantes resultaram em um aumento significativo no crescimento das mudas, com um incremento de até 91% na biomassa em comparação aos controles. Além disso, os tratamentos com biochar e biofertilizante também reduziram as concentrações de cobre nas folhas, indicando um potencial para minimizar os efeitos de metais tóxicos frequentemente encontrados na silvicultura urbana.

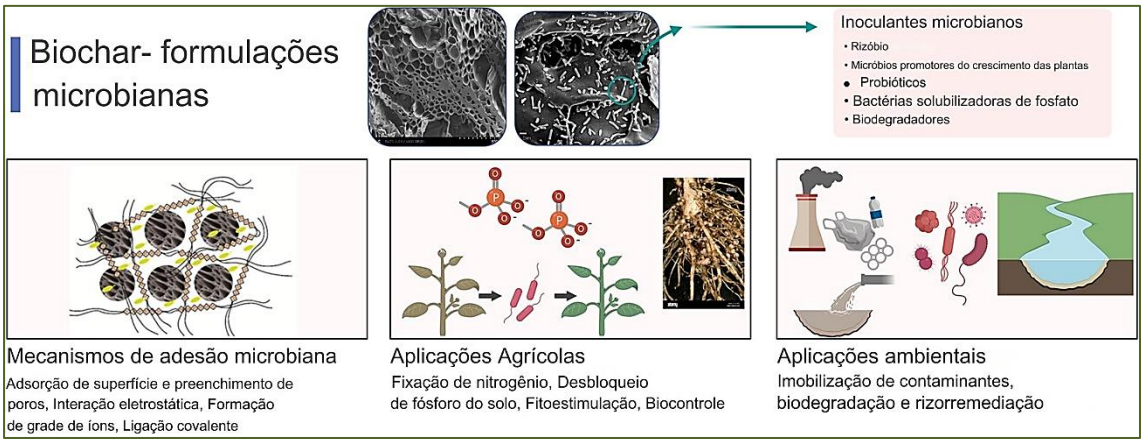
Além disso, a tecnologia de imobilização microbiana (TIM) foi rapidamente desenvolvida para remover poluentes de água e ou esgoto nos últimos anos, devido à sua alta estabilidade, rápida taxa de reação e alta atividade. Desse modo, o biochar é considerado um veículo eficiente para imobilização microbiana devido à sua alta porosidade e bom efeito de adsorção. Comparado com outras tecnologias de tratamento biológico, os microrganismos imobilizados em biochar podem melhorar a abundância microbiana, a taxa de utilização repetida, a capacidade metabólica microbiana entre outros (Li *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, a exposição de antibióticos aos ambientes tem recebido cada vez mais atenção, uma vez que pode causar sérias ameaças à saúde animal e humana. A tetraciclina (TC) é um dos antibióticos amplamente utilizados, embora tenha sido frequentemente detectada em águas superficiais, subterrâneas e potáveis devido à sua baixa eficiência metabólica. Vários processos de tratamento, incluindo fotodegradação, oxidação química, biodegradação e adsorção, foram aplicados para remover TC. Desse modo, o processo de adsorção para remoção de antibióticos na água, entre eles, tem recebido muita atenção por sua operação simples e eficaz, sem geração de produtos tóxicos (Qian *et al.*, 2015; Jan; Kan, 2019).

O uso de microrganismos imobilizados em biochar para tratar diferentes poluentes em águas residuais é um método de tratamento promissor. (Li *et al.*, 2022). Comparado com outros transportadores, o biochar tem sido amplamente considerado devido a sua área de superfície específica (ASE) relativamente grande, alta porosidade e forte capacidade de adsorção. Como um excelente transportador imobilizado, o biochar tem sido cada vez mais utilizado no tratamento de águas residuais pelo TIM. Os métodos atuais de microrganismos imobilizados em biochar incluem principalmente adsorção, incorporação e métodos eletroquímicos (Li *et al.*, 2022).

A tecnologia de microrganismos imobilizados em biochar combina as vantagens do biochar e dos microrganismos, o que tem um bom efeito de remoção e pouca poluição secundária (Cheng *et al.*, 2020). Por isso, o biochar tem boas perspectivas no tratamento de águas residuais. No entanto, a recuperação do complexo de biochar em pó e microrganismos após o tratamento de águas residuais é difícil. Como material de transporte, a capacidade de adsorção do biochar original é baixa e a faixa de adsorção é estreita (Li *et al.*, 2022).

Figura 2 Aplicações do biochar na agricultura.



Adaptado pela autora de Bolan *et al.* (2023).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biochar representa uma solução inovadora e sustentável para diversas questões ambientais, destacando-se na remediação de solos e águas, tratamento de águas residuais e sequestro de carbono. Suas características únicas, como a alta porosidade e grande área de superfície, permitem uma eficaz adsorção de contaminantes, tornando-o uma ferramenta valiosa para a descontaminação de ambientes afetados por poluentes orgânicos e metais pesados. A eficácia do biochar é fortemente influenciada pelas condições de sua produção, como a temperatura de pirólise e o tipo de biomassa utilizada, o que reforça a necessidade de otimização dos processos para maximizar seus benefícios. Além disso, sua produção é econômica e sustentável, representando uma alternativa viável a processos químicos mais caros e complexos. Com o avanço contínuo das pesquisas, o biochar tem o potencial de desempenhar um papel ainda mais significativo na gestão ambiental, oferecendo soluções práticas e eficazes para enfrentar os desafios da poluição e das mudanças climáticas

REFERÊNCIAS

[1] ARIF, M. et al. Biochar; a Remedy for Climate Change. **Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth**, p. 151–171, 2020.

[2] BOLAN, S. et al. The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. **Science of The Total Environment**, v. 886, p. 163968, 2023.

[3] CHA, J. S. et al. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1–15, 2016.

[4] ENAIME, G.; LÜBKEN, M. Agricultural Waste-Based Biochar for Agronomic Applications. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 8914, 2021.

[5] FEITOZA, S. et al. Use of Biochar Prepared from the Açaí Seed as Adsorbent for the Uptake of Catechol from Synthetic Effluents. **Molecules/Molecules online/Molecules annual**, v. 27, n. 21, p. 7570–7570, 2022.

[6] GOLDAN, E. et al. Evaluation of the Use of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment—A Review. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5309, 2022.

[7] GOROVTSOV, A. V. et al. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 42, n. 8, p. 2495–2518, 2019.

[8] HUANG, M. et al. Moleculares insights into the effects of pyrolysis temperature on composition and copper binding properties of biochar-derived dissolved organic matter. **Journal of Hazardous Materials**, v. 410, p. 124537, 2021.

[9] INYANG, M.; DICKENSON, E. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. **Chemosphere**, v. 134, p. 232–240, 2015.

[10] JANG, H. M.; KAN, E. Engineered biochar from agricultural waste for removal of tetracycline in water. **Bioresource Technology**, v. 284, p. 437–447, 2019.

[11] KHAN, R. et al. Sewage sludge derived biochar and its potential for sustainable environment in circular economy: Advantages and challenges. **Chemical Engineering Journal**, v. 471, p. 144495, 2023.

[12] KUMAR, A. et al. A perspective on biochar for repairing damages in the soil–plant system caused by climate change-driven extreme weather events. **Biochar**, v. 4, n. 1, 2022.

[13] KUMAR, R. et al. Rice husk biochar - A novel engineered bio-based material for transforming groundwater-mediated fluoride cycling in natural environments. **Journal of Environmental Management**, v. 343, p. 118222–118222, 2023.

[14] LEHMANN, J. et al. Biochar in climate change mitigation. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 12, p. 883–892, 2021.

[15] LI, R. et al. Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: A review. **Science of The Total Environment**, v. 837, p. 155563, 2022.

[16] MASUD, M. A. A. et al. A critical review of sustainable application of biochar for green remediation: Research uncertainty and future directions. **Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166813, 2023.

[17] MENDONÇA, S. M. et al. Açai seed biochar improves soil quality and black pepper seedling development in the Amazon region. **Journal of Environmental Management,** v. 367, p. 121752–121752, 2024.

[18] OLIVEIRA, F. R. et al. Environmental application of biochar: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 110–122, 2017.

[19] PARTHASARATHY, P. et al. A review on prominent animal and municipal wastes as potential feedstocks for solar pyrolysis for biochar production. **Fuel**, v. 316, p. 123378, 2022.

[20] PUETTMANN, M. et al. Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119564, 2020.

[21] QIAN, K. et al. Recent advances in utilization of biochar. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 1055–1064, 2015.

[22] RACEK, J. et al. Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. **Waste and Biomass Valorization**, 2019.

[23] RAFIQUE, M. et al. Enhancement of maize plant growth with inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and biochar amendment in soil. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 5, p. 460–469, 2017.

[24] RANGABHASHIYAM, S. et al. Sewage sludge-derived biochar for the adsorptive removal of wastewater pollutants: **A critical review**. v. 293, p. 118581–118581, 2021.

[25] RASHID, M. et al. Prospects of Biochar in Alkaline Soils to Mitigate Climate Change. **Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth**, p. 133–149, 2020.

[26] SAHOO, K. et al. Life-cycle assessment and techno-economic analysis of biochar produced from forest residues using portable systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2020.

[27] SAHOO, K. et al. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. **Applied Energy**, v. 235, p. 578–590, 2019.

[28] SANTOS, R. et al. Euterpe oleracea-based biochar for clonazepam adsorption: synthesis, characterization, adsorption properties, and toxicity assays. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 18, p. 52485–52497, 2023.

[29] SATO, M. K. et al. Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. **Waste management**, v. 96, p. 158–167, 2019.

[30] SEOW, Y. X. et al. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 107017, 2022.

[31] SIFTON, M. A.; SMITH, S. M.; THOMAS, S. C. Biochar-biofertilizer combinations enhance growth and nutrient uptake in silver maple grown in an urban soil. **PloS one**, v. 18, n. 7, p. e0288291–e0288291, 2023.

[32] SINGH, S. et al. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges and future prospects**. Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122259, 2020.

[33] THINES, K. R. et al. Synthesis of magnetic biochar from agricultural waste biomass to enhancing route for waste water and polymer application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 257–276, 2017.

[34] WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, 2019.

[35] XIANG, W. et al. Microwave-assisted pyrolysis derived biochar for volatile organic compounds treatment: Characteristics and adsorption performance. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127274–127274, 2022.

[36] YRJÄLÄ, K.; RAMAKRISHNAN, M.; SALO, E. Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 26, p. 100339, 2022.

[37] YU, S. et al. A review on recent advances of biochar from agricultural and forestry wastes: Preparation, modification and applications in wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 111638, 2024.

[38] YUAN, H. et al. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. **Geoderma**, v. 267, p. 17–23, 2016.

[39] ZEIDABADI, Z. S. et al. Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 301–308, 2018.

[40] ZIELIŃSKA, A. et al. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 201–213, 2015.

Capítulo 7

Cultivo sustentável de cogumelos: avaliação de substratos agrícolas para Pleurotus ostreatus

Mayara Gomes Tomassoni[1]
Debora Marina Bandeira[2]
Andressa Luiza Machado dos Santos[3]
Silvana Damin[4]
Eli Marchesan[5]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[6]

Resumo: O consumo de cogumelos comestíveis tem se tornado cada vez mais popular. O aumento na produção de cogumelos ocorre principalmente devido aos seus benefícios nutricionais, uma vez que são ricos em fibras, proteínas e vitaminas. Além de apresentarem valor gastronômico, destacam-se pela importância medicinal e econômica. O aproveitamento de resíduos agrícolas é fundamental para minimizar os impactos ambientais e para o fortalecimento da economia, pois agrega valor a materiais que antes seriam descartados. O fungo *Pleurotus ostreatus*, conhecido como cogumelo ostra, é um decompositor de matéria vegetal e uma das espécies mais cultivadas devido à facilidade de cultivo e sabor agradável. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi realizar uma análise comparativa dos substratos feno, serragem e folha de bananeira na produção de cogumelos *Pleurotus ostreatus*. O inóculo foi adquirido da empresa Funghi & Flora (Valinhos, SP), armazenado em sacos com grãos de cevada. Foram testados sete tratamentos compostos por feno, folha de bananeira e serragem (maravalha), isoladamente e em combinações. Os substratos foram umedecidos, corrigidos com calcário, autoclavados e resfriados antes da inoculação. O substrato mais promissor foi o composto de 33% de Feno, 33% de Maravalha e 33% de Folha de Bananeira, seguido do substrato constituído de 50% de Feno e 50% de Folha de Bananeira, com uma eficiência biológica (EB) de 100% e 79%, respectivamente. O uso de resíduos agrícolas no cultivo de *Pleurotus sp*. é uma estratégia eficiente para garantir bom desenvolvimento e produtividade, além de representar uma alternativa sustentável para a reciclagem de resíduos orgânicos.

Palavras-chave: Benefícios nutricionais. Cogumelo ostra. Reciclagem de resíduos.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0006-7484-4152
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0001-5956-7210
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-4902-0972
[4] Mel Bioreal/ Realeza – PR https://orcid.org/0000-0003-4560-9306
[5] Universidade Paranaense (UNIPAR)/ Francisco Beltrão – PR https://orcid.org/0000-0001-8995-6989
[6] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

Os cogumelos comestíveis, apreciado por seu valor gastronômico e seu elevado conteúdo proteico, tem ganhado cada vez mais importância nos últimos anos, principalmente pela possibilidade de reciclar economicamente certos resíduos agrícolas e agroindustriais (Kamthan; Tiwari, 2017). Como são pouco exigentes em relação aos substratos e de bom desenvolvimento em condições rústicas (Schmidt *et al*., 2003; Almi *et al*., 2017), no Brasil seu cultivo destaca-se nas regiões Sul e Sudeste.

Na classe dos basidiomicetos, destacam-se os fungos do gênero *Pleurotus* spp., pois são ricos em proteínas, fibras, carboidratos, vitaminas, aminoácidos essenciais e não essenciais, além de minerais, como cálcio, potássio, iodo e fósforo, representando uma ótima alternativa de nutrição (Raman *et al*., 2021).

Atualmente, um dos principais focos das atividades agroindústrias é a reciclagem de resíduos. Desta maneira, uma agregação de valor a resíduos que antes seriam descartados favorece o crescimento da economia e da agricultura familiar (Junior *et al*., 2014).

O *Pleurotus ostreatus* como um fungo decompositor de matéria vegetal, é encontrado praticamente no mundo todo, ocorrendo naturalmente nas matas brasileiras (Alfaro *et al*., 2016). Além disso, apresenta crescimento rápido comparado a outros fungos, tolera uma ampla variação de temperatura e dificilmente é atacado por pragas (Anukwuorji; Omumu; Ikegbunam, 2025).

Durante o processo de colonização e frutificação de cogumelos do gênero *Pleurotus,* utilizando como substrato as folhas de bananeira, ocorre a degradação do material lignocelulósico deste substrato pela ação de enzimas lignocelulolíticas secretadas pelo fungo, com liberação de compostos de carbono e consequente alteração da relação Carbono: Nitrogênio (Adebayo; Martínez-Carrera, 2015).

Entre as gramíneas tropicais, o feno é definido como a forragem conservada através da sua desidratação, reduzindo-se o seu teor de umidade. Estes resíduos caracterizam-se por apresentar alto teor de fibra e baixo teor de proteínas brutas, constituído, principalmente, por três compostos ligados entre si: a celulose, a hemicelulose e a lignina. Contudo, a lignina não é digerível por ruminantes, além de dificultar o acesso dos microrganismos ruminais à celulose e hemicelulose. Dessa forma, a degradação desse composto é essencial para tornar o feno mais nutritivo (Astudillo-Neira *et al*., 2022).

A indústria madeireira gera quantidades expressivas de serragem. No Japão, um dos maiores produtores de cogumelos ostra (*Pleurotus ostreatus*) do mundo, o substrato mais utilizado na produção de inóculo e no cultivo dos cogumelos é a serragem de madeira suplementada com farelo de arroz ou trigo (Fadel *et al.*, 2002).

Os cogumelos do gênero *Pleurotus* spp. são de cultivo relativamente fácil, podendo-se utilizar resíduos agrícolas umedecidos e pasteurizados (Bellettini *et al*., 2019), sendo que no Brasil são cultivados tradicionalmente em bagaços de cana-de-açúcar. Neste experimento, optou-se por testar três substratos de fácil acesso na região, no Sudoeste do Paraná, sendo eles o feno, a serragem e a folha de bananeira.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa dos substratos feno, serragem e folha de bananeira na produção de cogumelos *Pleurotus ostreatus*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. LOCAL E PERÍODO DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Biotecnologia da Universidade Paranaense, no período de abril a novembro de 2017.

2.2. AQUISIÇÕES DE SPAM

Os spams ou semente-inoculo, foram adquiridos através da empresa Funghi & Flora que está localizada na cidade de Valinhos, São Paulo.

O Spam miceliado encontrava-se em substrato a base de grãos, mais especificamente em grão de cevada, armazenado em saco plástico de 500 gramas.

2.2.1. SUBSTRATOS E PREPARO

Os substratos para a produção de cogumelos *Pleurotus ostreatus* devem estar secos sem o auxílio de herbicidas, sendo esses adquiridos através de doações. Para este experimento foram utilizados resíduos agroindustriais, como feno, folha de bananeira e serragem (maravalha) como substrato.

Em recipientes previamente limpos e higienizados, foram adicionados os substratos, além de 300 gramas de calcário para auxiliar na regularização do pH, e cobertos com água para umedecê-los.

Os substratos permaneceram aproximadamente 16 horas imersos. Após este processo, foram retirados e colocados em uma peneira para escorrer o excesso de água. Após comprovar que a umidade se encontrava adequada, pesou-se um total de 300 gramas para um determinado substrato, sendo divido em sete tratamentos, sendo eles:

1. Feno 100%;
2. Serragem (maravalha) 100%;
3. Folha de bananeira 100%;
4. Feno 50% + Serragem (maravalha) 50%;
5. Feno 50% + Folha de bananeira 50%;
6. Serragem (maravalha) 50% + Folha de bananeira 50%;
7. Feno 33% + Folha de bananeira 33% + Serragem (maravalha) 33%.

Para este experimento foram utilizados sacos plásticos de polipropileno de 18x30 centímetros. O preenchimento dos sacos com os substratos úmidos foi realizado com o auxílio de um tubo de PVC (100 milímetros de diâmetro). Não foram pressionados para evitar compactação, pois prejudica o crescimento do micélio do fungo.

Com o término do preenchimento dos sacos com os substratos, foram amarrados e autoclavados para a eliminação de microrganismos indesejados. Após, o substrato ficou um período de no mínimo 12 horas em processo de resfriamento, atingindo no máximo 25º C, encontrando-se assim pronto para a inoculação.

2.2.2. INOCULAÇÃO

Com o auxílio de um fluxo laminar devidamente limpo e higienizado, cada saco foi inoculado com aproximadamente 20 gramas de Spam (uma colher de sopa). Em seguida, foi confeccionado um tampão na boca do saco, utilizando algodão esterilizado, com aproximadamente dois centímetros de diâmetro, e amarrado com barbante. Isto permite a entrada de ar e atua como filtro, evitando contaminações.

Toda metodologia foi baseada na cartilha produzida pela Universidade Estadual Centro-Oeste - UNICENTRO, intitulada de "Produção de cogumelos de *Pleurotus ostreatus* (Hiratake) em pequenas propriedades rurais".

Os dados obtidos foram submetidos ao teste ANOVA e comparados pelo teste Tukey ($p < 0,05$), usando o programa Winstat.

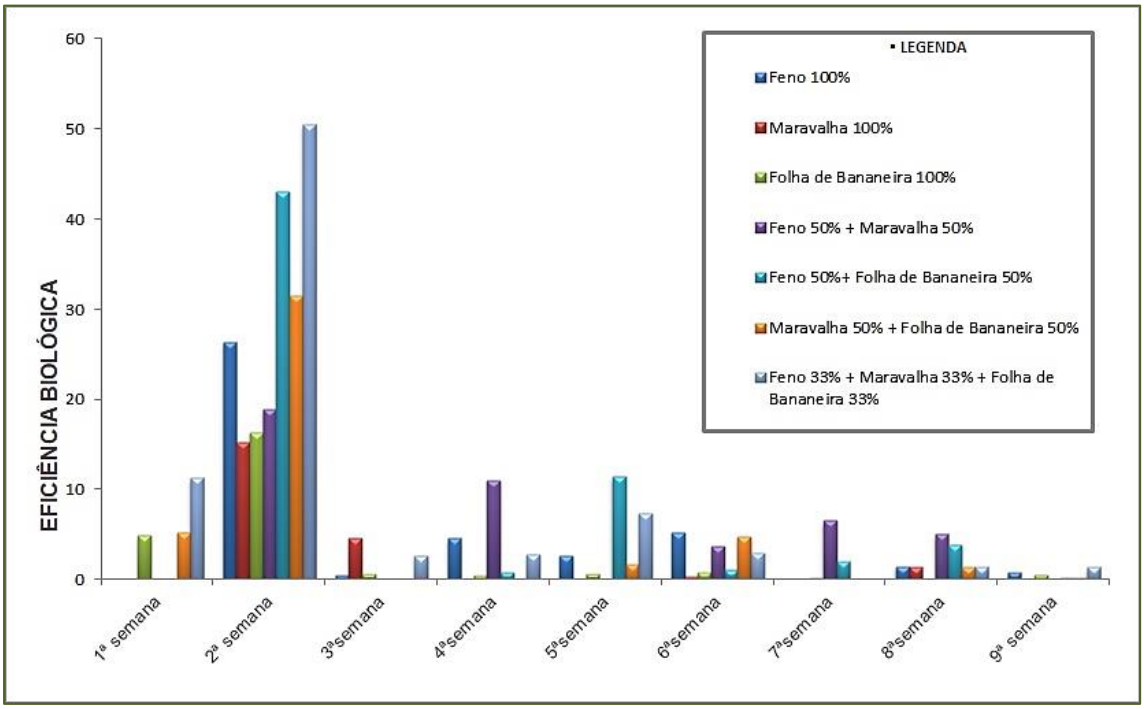
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Estrada e Pecchia (2017), um dos fatores determinantes no cultivo de cogumelos é a seleção de substratos. Os materiais adequados, tanto biológicos quanto econômicos, são fundamentais para o sucesso do cultivo.

O desenvolvimento do micélio de *Pleurotus ostreatus* variou nos substratos testados (Figura 1), sendo o maior crescimento observado na segunda semana. O substrato mais promissor foi o composto de 33% de Feno, 33% de Maravalha e 33% de Folha de Bananeira, seguido do substrato constituído de 50% de Feno e 50% de Folha de Bananeira. A folha de bananeira é rica em material lignocelulósico, favorecendo assim o desenvolvimento dos corpos de frutificação do cogumelo, devido a facilidade do mesmo em degradar esse material (Richard *et al*., 2020).

Já no substrato de 100% maravalha, na mesma semana teve a menor produção, o que pode ter sido influenciado pelo fato de conter maravalha de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., os quais contém substâncias que impedem ou inibem o crescimento de outras espécies.

Figura 1 Eficiência biológica dos substratos testados em relação a variável tempo.



Fonte: Próprio autor.

Estudos indicam que teores elevados de lignina no substrato dificultam o desenvolvimento do fungo, pois ocorre um maior gasto metabólico ao se desenvolver em materiais ricos deste componente, dificultando o acesso à celulose e hemicelulose (Datta *et al*., 2017). Outros vários fatores podem ter influenciado o crescimento, como a falta de uma estufa própria para o desenvolvimento, com controle de umidade e temperatura. O experimento foi montado em uma sala pequena com baixa luminosidade, adaptada com algumas bacias contendo água para manter o lugar úmido, além de borrifadores utilizados a cada observação.

Entretanto, segundo a Cartilha de Produção de Cogumelos *Pleurotus ostreatus* da Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro), recomenda-se que a temperatura fique em torno dos 25º C e a umidade entre 60 e 65%.

De acordo com a análise estatística, houve diferença significativa na produção de cogumelos entre os substratos Feno 100% e Maravalha 100%, comparado com Feno 33% + Maravalha 33% + Folha de Bananeira 33%. Em relação aos demais substratos, não houve diferença significativa.

A Eficiência Biológica (Tabela 1) é influenciada pelo tipo de substrato, umidade, temperatura, luminosidade, pH, oxigênio, relação C/N e linhagem do fungo (Suwannarach *et al*., 2022). A maior eficiência biológica (EB) foi encontrada no substrato composto por Feno 33% + Maravalha 33% + Folha de Bananeira 33%, alcançando 100%, seguido do feno 50% + Folha de Bananeira 50%, com EB à 79%. Conforme Corrêa *et al*. (2016), *Pleurotus* spp. são caracterizados por rápido crescimento e alta eficiência biológica.

Tabela 1 Análise estatística de Eficiência Biológica e produção dos cogumelos.

Substrato	Tempo de corrida (dias)	Médias dos Substratos (gr)	Eficiência Biológica
Feno	30	46,33 **AB**	71%
Maravalha	30	24,07 **B**	25%
Folha de Bananeira	30	26,83 **B**	24%
Feno + Maravalha	30	50,33 **AB**	63%
Feno + FB	30	69,44 **AB**	79%
Maravalha + FB	30	49,83 **AB**	49%
Feno+Maravalha +FB	30	89,58 **A**	100%

*FB= folha de bananeira. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

Segundo Carvalho *et al*. (2013), a partir dos resultados obtidos no estudo de cultivo *in vitro* de *Pleurotus ostreatus* em resíduos de bananeira, verificou-se que a utilização do substrato é viável para o cultivo *in vitro* dessa espécie, apresentando-se como uma ótima alternativa para o cultivo, além de reduzir a sua disposição no meio ambiente.

A Tabela 2 apresenta a comparação da média de produção dos cogumelos nos substratos em semanas. A média geral na segunda semana teve a maior produção, totalizando 288,72 gramas de cogumelos, diferindo estatisticamente dos demais resultados. A semana com a menor produção foi a nona semana, devido ao fim das observações e o consumo dos nutrientes disponíveis em cada substrato.

O cultivo de cogumelos comestíveis é um processo biotecnológico por meio do qual resíduos orgânicos lenho-celulósicos são reciclados para produzir alimentos ricos em nutrientes, considerado como um processo que combina a produção de alimentos nutritivos com a redução da poluição ambiental (Estrada; Pecchia, 2017).

A escolha adequada do substrato para o cultivo de *Pleurotus* sp. é fundamental para a produção, considerando suas características químicas. Diversos tipos de substrato podem ser utilizados, desde que contenham celulose em sua composição. Sendo assim, palhas (cereais e fenos), serraduras, papel, cartão, estilhas de madeira, entre outros, podem ser utilizados de forma vantajosa e a baixo custo como base para o composto (Grimm *et al*., 2021).

Tabela 2 Média de produção de cogumelos em semanas.

Semanas	Média Geral Subs.	Média Subs. Feno	Média Subs, Maravalha	Média subs. FB	Média subs. F.+ M.	Média subs. F+FB	Média subs. M +FB	Média subs. F+M+FB
1ª	30,67 **B**	0,0 **B**	0,0 **A**	4,9 **A**	0,0 **B**	0,0 **B**	5,3 **B**	11,3 **B**
2ª	288,72 **A**	26,4 **A**	15,3 **A**	16,3 **AB**	18,9 **A**	43,1 **A**	31,5 **A**	50,6 **A**
3ª	11,91 **B**	0,5 **B**	4,5 **A**	0,6 **AB**	0,0 **B**	0,0 **B**	0,0 **B**	2,6 **B**
4ª	28,35 **B**	4,6 **B**	0,0 **A**	0,5 **AB**	11,1 **AB**	0,8 **B**	0,0 **B**	2,9 **B**
5ª	34,03 **B**	2,7 **B**	0,0 **A**	0,6 **AB**	0,0 **B**	11,4 **B**	1,7 **B**	7,4 **B**
6ª	27,15 **B**	5,2 **B**	0,4 **A**	0,9 **AB**	3,7 **AB**	1,1 **B**	4,7 **B**	3,0 **B**
7ª	12,59 **B**	0,0 **B**	0,0 **A**	0,3 **AB**	6,5 **AB**	2,0 **B**	0,0 **B**	0,0 **B**
8ª	20,87 **B**	1,5 **B**	1,4 **A**	0,0 **AB**	5,1 **AB**	3,9 **B**	1,4 **B**	1,4 **B**
9ª	3,95 **B**	0,9 **B**	0,0 **A**	0,6 **AB**	0,0 **B**	0,2 **B**	0,2 **B**	1,4 **B**

F = Feno, M=Maravalha, FB= Folha de Bananeira. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

4. CONCLUSÃO

Utilizar resíduos agrícolas na produção de *Pleurotus* sp. é uma alternativa útil na produção, assegurando desenvolvimento e produtividade consideráveis, além de representar uma alternativa sustentável para a reciclagem de resíduos orgânicos.

REFERÊNCIAS

[1] ADEBAYO, E. A., MARTÍNEZ-CARRERA, D. Oyster mushrooms (*Pleurotus*) are useful for utilizing lignocellulosic biomass. **African Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 52–67, 2015.

[2] ALFARO, M. et al. Comparative and transcriptional analysis of the predicted secretome in the lignocellulose-degrading basidiomycete fungus *Pleurotus ostreatus*. **Environmental Microbiology**, v. 18, n. 12, p. 4710–4726, 2016.

[3] ALMI, H. et al. Multiplication and production of oyster mushroom on laboratory scale on different substrates. **European Journal of Physical and Agricultural Sciences**, v. 5, n. 1,p. 49–54, 2017.

[4] ANUKWUORJI, C. A.; OMUMU, N. V.; IKEGBUNAM, N. C. Comparative effects of nitrogen-based and non-nitrogen-based substrates on the proximate contents of *Pleurotus* species. **Journal of the Faculty of Biosciences**, v. 12, n. 2, p. 182–191, 2025.

[5] ASTUDILLO-NEIRA, R. et al. Bioconversion in Ryegrass-Fescue Hay by Pleurotus ostreatus to Increase Their Nutritional Value for Ruminant. **Agriculture**, v. 12, n. 534, 2022

[6] BELLETTINI, M. B. et al. Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, p. 633–646, 2019.

[7] CARVALHO, C. S. M. DE et al. In vitro cultivation of *Pleurotus ostreatus* in banana tree residues. **Revista Ambiência**, v. 9, n. 3, p. 651 – 660, 2013.

[8] CORRÊA, R. C. G. et al. Spent mushroom substrate of *Pleurotus pulmonarius*: a source of easily hydrolyzable lignocellulose. **Folia Microbiologica**, v. 61, n. 5, p. 439–448, 2016.

[9] DATTA, R. et al. Enzymatic degradation of lignin in soil: A review. **Sustainability**, v. 9, n. 1163, 2017.

[10] ESTRADA, A. E. R; PECCHIA, A. Cultivation of *Pleurotus ostreatus*. Edible and Medicinal Mushrooms: **Technology and Applications. Hoboken**, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Ltd., 2017.

[11] FADEL, M. et al. Factores influencing solid wate generation and management. **Waste Management**, v. 22, p. 269276, 2002.

[12] GRIMM, A. et al. Cultivation of *Pleurotus ostreatus* Mushroom on Substrates Made of Cellulose Fibre Rejects: Product Quality and Spent Substrate Fuel Properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 8, p. 4331–4340, 2021.

[13] JUNIOR, N. L. et al. **Cultivo integrado dos cogumelos do gênero *Pleutotus ostreatus* e *Agaricus blazei***. Universidade da Região de Joinville- UNIVILLE. 2014. Disponivel em: https://www.researchgate.net/publication/242288044_Cultivo_integrado_dos_cogumelos_do_genero_Pleurotus_ostreatus_e_Agaricus_blazei. Acesso em: 23 de out. 2017.

[14] KAMTHAN, R.; TIWARI, I. Agricultural Wastes- Potential Substrates For Mushroom Cultivation. **European Journal of Experimental Biology**, v. 7, n. 5, 2017.

[15] RAMAN, J. et al. Cultivation and Nutritional Value of Prominent *Pleurotus* Spp.: An Overview. **Mycobiology**, v. 49, n. 1, p. 1–14, 2021.

[16] RICHARD E. N. et al. Two-stage banana leaves wastes utilization towards mushroom growth and biogas production. **3 Biotech**, v. 10, n. 542, 2020.

[17] SCHMIDT, P. et al. Tratamento do Feno de Braquiária pelo Fungo *Pleurotus ostreatus*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 6, p.1866–1871, 2003.

[18] SUWANNARACH, N. et al. Impact of Cultivation Substrate and Microbial Community on Improving Mushroom Productivity: A Review. **Biology**, v. 11, n. 569, 2022.

Capítulo 8

Do resíduo ao recurso: microbiologia aplicada à valorização de subprodutos do pescado

Camila Vogt dos Santos[1]
Andressa Luiza Machado dos Santos[2]
Mayara Maria de Souza[3]
Mayara Gomes Tomassoni[4]
Carina Contini Triques de Almeida[5]
Mônica Lady Fiorese[6]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[7]

Resumo: A piscicultura gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos, que incluem pele, escamas, ossos, cabeças e vísceras, representando até 60% do peso vivo do peixe. Esses resíduos possuem alto valor nutricional e, quando submetidos à hidrólise enzimática, podem ser convertidos em hidrolisados ricos em peptídeos e aminoácidos. Este estudo visa otimizar a produção desses hidrolisados e avaliar sua eficácia como substitutos econômicos e sustentáveis das fontes tradicionais de nitrogênio em meios de cultura microbiana. Serão realizados experimentos comparativos utilizando diferentes cepas de microrganismos para medir a taxa de crescimento, produtividade e atividade metabólica em meios contendo hidrolisados de pescado em comparação com fontes convencionais de nitrogênio. Além disso, o projeto analisará os benefícios ambientais e econômicos do uso de hidrolisados de pescado, promovendo a economia circular e a redução de impactos ambientais negativos. Diante disso, essa revisão bibliográfica busca alternativas inovadoras e sustentáveis para a biotecnologia industrial, destacando o potencial dos subprodutos da piscicultura na preservação ambiental e na redução de custos. Ademais, discute sobre a viabilidade econômica como uma fonte alternativa para a produção de meios de cultura.

Palavras-chave: Aproveitamento de resíduos. Fonte de Nitrogênio. Hidrólise enzimática.

[1] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0001-7566-8003
[2] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0000-5806-665X
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0000-0444-1442
[4] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0006-7484-4152
[5] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo -PR https://orcid.org/0000-0002-0397-958X
[6] Laboratório de Engenharias Sustentáveis (LabLES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Toledo – PR https://orcid.org/0000-0001-5250-7178
[7] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Piscicultura (Peixe BR) em seu relatório anual, em 2023 o Brasil produziu cerca de 887.029 toneladas de peixes de cultivo, com crescimento de 3,1% sobre o ano anterior. No relatório, ainda é possível observar que esse grande crescimento também pode ser visto na exportação, já que o Brasil comercializou 6.815 toneladas de peixe, resultado esse que é 4% a mais do que o obtido em 2022 (Peixe BR, 2024; Nascimento; Denadai, 2024). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura, sugere que essa produção deva aumentar 15% até 2030 (FAO, 2022).

Em decorrência do crescimento da piscicultura ocorre um aumento na geração de resíduos sólidos orgânicos, resultado principalmente do processo de fabricação de filés de peixe, que incluem pele, escamas, ossos, cabeça, vísceras e músculos de partes não filetáveis, podendo chegar até 60% do peso vivo do animal (Barcelar; Muratori, 2020; Robalo *et al.*, 2024). Resíduos do pescado possuem alta concentração de material orgânico, quando manejada de forma incorreta pode levar a problemas ambientais como, aumento de nitrogênio e fósforo em corpos hídricos, além de causarem decréscimo no oxigênio dissolvido, comprometendo a manutenção de vidas aquáticas, formação de chorume (ácidos orgânicos), e ainda causar proliferação de vetores a mau cheiro (Decker *et al.*, 2016; Mezzomo; Silva, 2021).

Embora grande parte do resíduo do pescado já seja destinado à produção de farinha, essa opção não é uma das mais vantajosas visto que não proporciona retorno econômico favorável para a indústria, quando levado em conta o grande investimento em equipamentos e alto consumo energético (Valente *et al.*, 2014). Com isso, é necessário buscar por novas soluções que agreguem valor aos resíduos e subprodutos animal, bem como oferecer às indústrias novas oportunidades para um desenvolvimento mais sustentável. Os resíduos de pescado possuem grande potencial para sua reutilização como fontes não convencionais e de baixo custo, resultando em uma atividade autossustentável, trazendo muitos benefícios como a prevenção do prejuízo econômico e principalmente, da degradação ambiental (Ogava *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2009).

Uma alternativa promissora para o aproveitamento desses resíduos é a produção de hidrolisados proteicos, que possuem uma versatilidade e potencial aplicação em diversas áreas, como ingrediente em alimentos funcionais, suplementos nutricionais, rações animais e na indústria de cosméticos, devido às suas propriedades bioativas (Araujo *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2021). Com isso, utilizar os resíduos do pescado como matéria-prima para produção de hidrolisados proteicos representa uma solução sustentável e inovadora para as indústrias, reduzindo impactos ambientais, além de contribuir com a criação de novos mercados para subprodutos de alto valor agregado (Hijazin; Simões; Silveira, 2010).

Uma aplicação biotecnológica para esses produtos de alto valor agregado, seria a utilização em meios de cultura microbianos. A indústria biotecnológica necessita de grande demanda desses meios, onde componentes utilizados como fonte de nitrogênio para o crescimento dos microrganismos possuem custo muito elevado, limitando seu uso em processos comerciais (Aspmo; Horn; Eijsink, 2005).

Nesse sentido, a busca por alternativas sustentáveis para a formulação de meios de cultura torna-se essencial, visando equilibrar viabilidade econômica e preservação ambiental. A utilização de hidrolisados proteicos surge como uma solução promissora, permitindo a substituição de fontes tradicionais de nitrogênio em processos

biotecnológicos (Fallah; Bahram; Javadian, 2015). Dessa forma a revisão bibliográfica apresenta sobre a produção, aplicação e potencial dos hidrolisados proteicos como alternativa para o aproveitamento desses resíduos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSUMO E PRODUÇÃO DA CARNE DE PEIXE

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) em 2020, o consumo mundial do pescado atingiu 157 milhões de toneladas, representando um consumo de 20,2 kg per capita. Esses dados são considerados recorde, já que é mais que o dobro registrado nos anos 60 (FAO, 2024). No Brasil, o consumo de pescado também tem crescido significativamente nos últimos anos, em 2004 o consumo médio per capita era de 6,5 kg por habitante, em 2023 obteve-se um consumo de aproximadamente 10 kg, um crescimento de 65% (FAO, 2024).

Esse aumento considerável no consumo do pescado se deve a diversos fatores, como a busca por alimentos mais saudáveis (Wagner; Coelho; Travassos, 2023) e também ao incentivo de programas de compras públicas para abastecer escolas, já que peixes e frutos do mar (sejam capturados ou cultivados) oferecem uma excelente fonte de proteína de alta qualidade, baixo teor de gordura saturada, além de fornecerem altas concentrações de ácidos graxos ómega-3, vitaminas e minerais (selênio, iodo e zinco) que são essenciais (Tacon; Lemos; Metian, 2020; FAO, 2022).

Ademais, a expansão da indústria aquícola teve um crescimento significativo, em 2022 a produção brasileira de peixe chegou a 860.355 toneladas, um aumento de 2,3% quando comparado com o produzido em 2021 (Peixe BR, 2024). A tilápia, por exemplo, continua sendo o peixe mais cultivado no Brasil, sendo produzido 550.060 toneladas em 2022, o estado do Paraná foi responsável pela produção de mais de 34% do volume total (Peixe BR, 2024). Além disso, em relatório da FAO, o Estado Mundial da Pesca e Aquicultura de 2016, revelou que espera registrar um crescimento de 104% na produção de pesca e aquicultura em 2025.

A sustentabilidade ambiental é outro fator que tem sido levado em consideração pelos consumidores na hora de escolherem a carne de peixe ao invés da carne bovina, a pesca e a aquicultura são uma das opções mais sustentáveis quando administradas da maneira correta, gerando menos impactos ambientais (Wagner; Coelho; Travassos, 2023).

2.2. GERAÇÃO E APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

Com o significativo aumento na produção de pescado nos últimos anos, a preocupação com a quantidade de resíduos gerados pelo processamento industrial aumenta. Aproximadamente 70% do pescado consumido mundialmente é submetido a processamento antes de serem comercializados (Araujo *et al.*, 2021). Depois do processamento apenas 40% são utilizados para o consumo enquanto os outros 60% são descartados em forma de resíduos (Halim; Yusof; Sarbon, 2016; Korkmaz; Tokur, 2021).

O pescado branco, por exemplo, a cada 1000 gramas processados o total descartado pode chegar a 640 gramas, distribuídos em ossos, vísceras, cabeças e peles (Ghaly *et al.*, 2013). Este volume requer atenção já que este subproduto não é muito bem administrado pelas indústrias, onde apenas 64% são destinados para fabricação de

farinha de pescado e óleo de peixe para alimentação animal, já os outros 36% não possui um destino certo, na maioria das vezes despejados em lixões, córregos, rios e mares, considerado inadequado no ponto de vista ambiental já que a quantidade de resíduo descartado é praticamente a mesma do que é consumido (Karim; Lee; Arshad, 2015; Illera-Vives *et al.*, 2015; Pinto *et al.*, 2017; Chambo, 2018; Hemker *et al.*, 2020; Araujo *et al.*, 2021).

Nesse contexto, é essencial buscar aplicações que sejam ecologicamente aceitáveis para o reaproveitamento desses resíduos gerados pelas indústrias durante o processamento do pescado, além da fabricação de farinhas (Hemker *et al.*, 2020). Resíduos contendo cabeça, abas da barriga e vísceras são considerados de bom valor nutricional, contendo proteínas, lipídeos e ácidos graxos ômega-3, além de serem ricos em micronutrientes como vitamina A e D, riboflavina, niacina e minerais (Ghaly *et al.*, 2013; Olsen; Toppe; Karunasagar, 2014; Hemker *et al.*, 2020; Araujo *et al.*, 2021).

Há uma infinidade de maneiras para utilizar os resíduos do pescado como matéria-prima, podendo ser destinados a produção de colágeno, gelatina, enzimas, proteínas especificas e pigmentos (Ghaly *et al.*, 2013). Além disso, as proteínas provenientes da carne de peixe possuem um melhor equilíbrio de aminoácidos quando comparadas a outras fontes de proteína animal e vegetal, podendo ser aproveitada de uma maneira mais nobre (Araujo *et al.*, 2021).

Uma prática eficiente para valorização dessa matéria-prima é a hidrólise enzimática, essa prática inclui a recuperação de nutrientes essenciais (Blanco; Sotelo; Pérez-Martín, 2015) e compostos bioativos (Halim; Yusof; Sarbon, 2016). Os hidrolisados proteicos do pescado demonstram excelente propriedades funcionais como antioxidantes, agentes farmacológicos (Nasri *et al.*, 2013), antimicrobianos (Wang *et al.*, 2018), além de serem ricos em proteínas solúveis com alta digestibilidade, o que favorece seu uso em dietas na aquicultura (Swanepoel; Goose, 2018).

Diante disso, utilizar subprodutos da indústria alimentícia na produção de hidrolisados proteicos é considerado um dos métodos de maior valorização, já que no processo de hidrólise ocorre o melhoramento nutricional, além de contribuir com a liberação de componentes com ação funcional (Toldrá; Moura; Reig, 2016).

2.3. HIDRÓLISE

Buscar cada vez mais soluções que visam tecnologias limpas é importante quando se trata da proteção dos recursos naturais. Uma maneira de combater o grande descaso com o meio ambiente, é utilizar os resíduos das indústrias alimentícias como matéria-prima na produção de hidrolisados proteicos (Hijazin; Simões; Silveira, 2010).

O processo de hidrólise ocorre através da clivagem, ou seja, da quebra de uma molécula em duas ou mais partes menores, essa reação ocorre em meio aquoso e pode ser catalisado por ácidos, bases ou enzimas. Portanto, quando uma porção rica em proteínas, como é o caso do pescado, passa pelo processo de hidrolise, resulta em uma parte solúvel rica em proteínas, peptídeos e aminoácidos livres (Adler-Nissen, 1986; Araújo *et al.*, 2009).

Diante disso, a hidrolise se mostra eficiente na solubilização de proteínas e pode ocorrer por 3 métodos: ácida, alcalina e enzimática (Hijazin; Simões; Silveira, 2010). A hidrólise química (ácida e alcalina) é considerada um método severo, onde a quebra das

ligações peptídicas ocorre através da utilização de bases e ácidos fortes, com pressão e temperaturas elevadas (Araújo *et al.*, 2009). Esse tipo de hidrólise tem desvantagens já que são necessárias condições especificas de temperatura e pH, uso de reagentes caros e perigosos, além de ser difícil controlar o processo, podendo ocorrer a quebra de ligações peptídicas não específicas, comprometendo a qualidade do produto (Villamil; Váquiro; Solanilla, 2017).

Por outro lado, a hidrólise enzimática é o método mais escolhido, como o próprio nome diz, envolve a aplicação de enzimas proteolíticas digestivas de origem vegetal ou animal (Etemadian *et al*., 2021). Além disso, é considerada um método rápido, de fácil reprodução e controle, sendo possível evitar reações indesejadas que possam destruir os componentes de alto valor (Araujo *et al.*, 2021; Hijazin; Simões; Silveira, 2010). Ademais, é vantajosa no ponto de vista ambiental quando comparada com a hidrólise química, pois não gera contaminantes tóxicos, químicos e microbianos (Hijazin; Simões; Silveira, 2010; Pasupuleti; Braun, 2010).

2.4. HIDRÓLISE ENZIMÁTICA E APLICAÇÃO DE HIDROLISADOS PROTEICOS

A hidrólise enzimática é um processo biotecnológico que faz o uso de enzimas que atuam como catalisadores biológicos, facilitando a quebra de ligações químicas de maneira eficiente e específica, alterando as propriedades físico-químicas, funcionais e sensoriais, evitando subprodutos indesejados. É justamente, a especificidade do processo, com condições controladas, que acaba tornando o processo mais adequado, resultando em produtos de alta qualidade (Adler-Nissen, 1986; Hijazin; Simões; Silveira, 2010; Sharma; Singh; Rana, 2011).

As enzimas utilizadas para a hidrólise podem ser de origem microbiana (alcalase, protamex, neutrase, etc.), vegetal (papaína e bromelaína) ou de origem animal (pepsina, tripsina, etc.) (Etamadian *et al.*, 2021). Dentre as opções de enzimas, as de origem microbianas possuem maior resistência ao calor, pH alto e propriedades proteolíticas apropriadas (Diniz; Martin, 1997).

Além disso, as enzimas utilizadas na hidrolise de produtos ricos em proteínas são capazes de quebrar ligações proteicas, esse processo não altera o valor nutricional do produto, mantendo o perfil de aminoácidos essencial para a nutrição (Adler-Nissen, 1986; Tavano, 2013). Ademais, ao final do processo, os hidrolisados proteicos apresentam melhorias significativas nas propriedades funcionais, como absorção de água e óleo, solubilidade, digestibilidade e capacidade de emulsificação, tornando-os ingredientes valiosos em formulações alimentares e suplementos nutricionais (Tavano, 2013).

Antigamente, os hidrolisados proteicos tinham restrições na sua aplicação, principalmente na indústria alimentícia, devido ao amargor, mas com a utilização de substâncias como ácidos, polifosfatos, carvão ativado, glicina ou gelatina esse problema foi solucionado e, atualmente os hidrolisados proteicos possuem a melhor proteína em termos de propriedades nutricionais, com um bom equilíbrio ácido e alta digestibilidade (Etemadian *et al.*, 2021; Herpandi *et al.*, 2012).

No geral, os hidrolisados proteicos têm sido aplicados de diferentes formas, como na indústria farmacêutica, já que previnem e/ou tratam diversas doenças, como câncer, doenças cardiovasculares e condições inflamatórias (Ahn; Je; Cho, 2012). Ademais, servem como fontes potenciais de proteínas e peptídeos bioativos que apresentam várias

atividades biológicas como: antioxidante (Sarmadi; Ismail, 2010), antimicrobiano (Najafian; Babji, 2012), e anticancerígeno (Ahn; Je; Cho, 2012).

Outra aplicação para os hidrolisados proteicos, podem ser na utilização como substrato para obtenção de peptonas, uma mistura de peptídeos e aminoácidos formada através da digestão enzimática de proteínas. Essas substâncias compõem meio de cultura para o crescimento microbiano, sendo principalmente uma fonte de carbono e nitrogênio (Pleissler; Venys, 2016).

Atualmente, os custos na produção de um meio de cultura estão atribuídos principalmente ao valor das peptonas, sendo assim, utilizar os hidrolisados proteicos em meios de cultura torna-se uma prática mais econômica, já que a matéria-prima é o resíduo da indústria alimentícia e, de baixo custo, o que torna essa prática mais econômica, além de ser uma alternativa sustentável (Djellouli *et al.*, 2017; Shi; Li; Blersch, 2018).

2.5. MEIO DE CULTURA PARA O CRESCIMENTO MICROBIANO

Para o crescimento de microrganismos é interessante destacar a importância do ambiente natural e suas necessidades nutricionais, desenvolvendo meios de cultura para o seu crescimento, isolamento e identificação (Bonnet *et al.*, 2020).

Os meios de cultura são preparações nutritivas utilizadas para o crescimento de bactérias, fungos e leveduras. Isso é possível, porque seus componentes fornecem os princípios nutritivos essenciais para os microrganismos (Tortora; Funke; Case, 2012).

Os nutrientes mínimos necessários em um meio de cultura para o crescimento microbiano são: água, uma fonte de nitrogênio, uma fonte de carbono e alguns sais minerais (Kumar, 2012). Além disso, podem ser encontrados vitaminas e aminoácidos, estes são considerados fatores de crescimento, e só estarão presentes em meio de cultura específico para o crescimento de um microrganismo específico (Pelczar Jr *et al*., 1996; Barbosa; De Lima Barbosa, 2010).

A água é fundamental na solubilização dos nutrientes, garantindo reações de hidrólise. Se ocorrer a evaporação durante a incubação do ágar, pode haver perda de água, resultando na diminuição do tamanho de colônia e inibição do crescimento microbiano (Power; Johnson, 2009; Kumar, 2012).

O carbono é o elemento mais abundante, sendo essencial sua produção, como gorduras, proteínas e ácidos nucléicos, as fontes de carbono em um meio de cultura são fornecidas principalmente por carboidratos, como açucares, ou por dióxido de carbono, fontes orgânicas e álcoois (Atlas, 2004; Kurbanoylu; Algur, 2002; Kumar, 2012). O nitrogênio permite que as bactérias sintetizem suas proteínas. Diversos compostos utilizados como componentes em meio de cultura servem como fonte de nitrogênio, podendo ser encontrados tanto na forma inorgânica (nitratos), como na forma orgânica, como os hidrolisados proteicos sendo eles proteose-peptona ou a triptona (Atlas, 2004).

Quando meios de cultura são formulados para incluir todos os componentes necessários para o crescimento de um microrganismo torna-se muito caro e, geralmente substâncias usadas como fonte de nitrogênio são os que possuem o custo mais elevado, limitando o uso em processos comerciais (Fallah; Bahram; Javadian, 2015).

Uma solução para reduzir os custos dos meios de cultura é a utilização dos hidrolisados proteicos do pescado como fonte de nitrogênio. Esses hidrolisados são ricos em aminoácidos e peptídeos, podendo facilmente substituir as fontes de nitrogênio

tradicionais. Além disso, são mais acessíveis economicamente, promovem o crescimento eficiente de diversos microrganismo, tornando-os uma alternativa viável e mais sustentável em processos comerciais de fermentação e biotecnologia (Fallah; Bahram; Javadian, 2015).

Várias pesquisas já foram realizadas, demonstrando que devido ao equilíbrio favorável de aminoácidos e alto teor de proteína, os hidrolisados do pescado representam uma fonte potencial de peptonas industriais (Horn; Aspmo; Eijsink, 2005; Aspmo; Horn; Eijsink, 2005; Gildberg *et al.*, 2010; Safari *et al.*, 2012).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente produção aquícola mundial tem gerado uma quantidade significativa de resíduos orgânicos, cujo descarte inadequado pode levar a sérios impactos ambientais. Diante disso, a valorização desses subprodutos por meio da hidrólise enzimática surge como uma alternativa sustentável, permitindo sua aplicação em diversas áreas.

Os hidrolisados proteicos obtidos a partir de resíduos do pescado apresentam potencial para substituir fontes convencionais de nitrogênio em meios de cultura microbiana, contribuindo para a redução de custos na produção biotecnológica e promovendo a economia circular. Além disso, sua utilização minimiza impactos ambientais, agregando valor a resíduos que seriam descartados de maneira inadequada.

Embora a hidrólise enzimática já seja amplamente estudada, ainda há desafios a serem superados, como a otimização dos processos enzimáticos, a padronização da composição dos hidrolisados e sua aplicabilidade em larga escala. No entanto, os avanços na área indicam que essa abordagem pode desempenhar um papel fundamental na sustentabilidade da indústria aquícola e biotecnológica. Assim, novas pesquisas e investimentos são essenciais para consolidar essa tecnologia como uma alternativa viável para o aproveitamento de resíduos da piscicultura.

REFERÊNCIAS

[1] ADLER-NISSEN, J. Enzimic hydrolysis of food proteins. Barking: ElsevierApplied Science, 1986.

[2] AHN, C. B.; JE, J. Y.; CHO, Y. S. Antioxidant and anti-inflammatory peptide fraction from salmon byproduct protein hydrolysates by peptic hydrolysis. **Food Research International**, v. 49, n. 1, p. 92-98, 2012.

[3] AOAC – Association Of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis**. (18ª ed.). Washington DC. 2010.

[4] ARAUJO, J. et al. Hidrólise enzimática de resíduos de pescado como alternativa para produção de produtos de alto valor agregado. **Valorização de Resíduos e Biomassa**, v. 12, p. 847-855, 2021.

[5] ARAÚJO, L. de F. et al. Enriquecimento proteico de alimentos por levedura em fermentação semissólida: alternativa na alimentação animal. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 3, n. 3, p. 47-53, 2009.

[6] ASPMO, S. I.; HORN, S. J.; EIJSINK, V. G. H. Hidrolisados de vísceras de bacalhau do Atlântico (*Gadus morhua* L.) como componentes de meios de crescimento microbiano. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 12, p. 3714-3722, 2005.

[7] ATLAS, Ronald M. **Handbook of microbiological media**. CRC press, 2004.

[8] BACELAR, R. G. A.; MURATORI, M. C. S. Utilização de resíduos de filetagem de tilápia na tecnologia de alimentos: uma revisão. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 2, p. 263-278, 2020.

[9] BAEK, H. H.; CADWALLADER, K. R. Enzymatic hydrolysis of crayfish processing by-products. **Journal of food science**, v. 60, n. 5, p. 929-935, 1995.

[10] BARBOSA, F. H. F.; DE LIMA BARBOSA, L. P. J. Alternativas metodológicas em Microbiologia-viabilizando atividades práticas. **Revista de biologia e Ciências da Terra**, v. 10, n. 2, p. 134-143, 2010.

[11] BLANCO, M.; SOTELO, C. G.; PÉREZ-MARTÍN, R. I. Hydrolysis as a valorization strategy for unused marine food biomass: Boarfish and small-spotted catshark discards and by-products. **Journal of Food Biochemistry**, v. 39, n. 4, p. 368-376, 2015.

[12] BONNET, Maryline et al. Bacterial culture through selective and non-selective conditions: the evolution of culture media in clinical microbiology. **New microbes and new infections**, v. 34, p. 100622, 2020.

[13] CHAMBO, A. P. S. Aproveitamento do resíduo de filetagem da tilápia do Nilo para produção de farinhas com potencial aplicação na alimentação humana. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em zootécnica. Maringá/PR. 2018.

[14] DA SILVA, N. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos**. Varela, 2007.

[15] DECKER, A. T. et al. Avaliação dos possíveis impactos ambientais dos resíduos de pescado na localidade de Pelotas/RS. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2016.

[16] DINIZ, F. M.; MARTIN, A. M. Optimization of nitrogen recovery in the enzymatic hydrolysis of dogfish (*Squalus acanthias*) protein. Composition of the hydrolysates. **International journal of food sciences and nutrition**, v. 48, n. 3, p. 191-200, 1997.

[17] DJELLOULI, M. et al. Effect of seafood peptones on biomass and metabolic activity by Enterococcus faecalis DM19. L**WT-Food Science and Technology**, v. 81, p. 94-100, 2017.

[18] ETEMADIAN, Y. et al. Desenvolvimento de hidrolisado proteico de origem animal/vegetal e sua aplicação nas indústrias de alimentos, rações e nutracêuticos: Estado da arte. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123219, 2021.

[19] FALLAH, M.; BAHRAM, S.; JAVADIAN, S. R. Fish peptone development using enzymatic hydrolysis of silver carp by-products as a nitrogen source in *Staphylococcus aureus* media. **Food Science & Nutrition**, v. 3, n. 2, p. 153-157, 2015.

[20] FAO, 2016. **Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura**. Disponível em: https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/423722/. Acesso em: 22 jun. 2024.

[21] FAO. 2022. **The State of World Fisheries and Aquaculture**. Disponível em: https://effop.org/news-events/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture-2022-fao-report/. Acesso em: 21 jun. 2024.

[22] FAO. 2024. **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura**. Disponível: https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1696371/. Acesso em: 22 jun. 2024.

[23] GAO, R. et al. Production, bioactive properties, and potential applications of fish protein hydrolysates: Developments and challenges. **Trends in Food Science & Technology**, v. 110, p. 687-699, 2021.

[24] GHALY, A. et al. Resíduos de processamento de peixe como fonte potencial de proteínas, aminoácidos e óleos: uma revisão crítica. **Micróbio. Bioquímica. Tecnologia,** v. 5, p. 107–129, 2013.

[25] GILDBERG, A. et al. Peptones from Atlantic cod stomach as nitrogen sources in growth media to marine bacteria. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 19, n. 2, p. 75-83, 2010.

[26] HALIM, N. R. A.; YUSOF, H. M.; SARBON, N. M. Functional and bioactive properties of fish protein hydolysates and peptides: A comprehensive review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 51, p. 24-33, 2016.

[27] HEMKER, A. K. et al. Effects of pressure-assisted enzymatic hydrolysis on functional and bioactive properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) by-product protein hydrolysates. **Lwt – Food Science and Technology**, v. 122, p. 109003, 2020.

[28] HERPANDI, H. et al. Degree of hydrolysis and free tryptophan content of Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) protein hydrolysates produced with different type of industrial proteases. **International Food Research Journal**, v. 19, p. 863-867, 2012.

[29] HIJAZIN, C. A. H.; SIMÕES, A. T.; SILVEIRA, D. R. Hidrólise ácida, alcalina e enzimática. **Revista Atitude – Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre**, n. 7, p. 89-93, 2010.

[30] HORN, S. J.; ASPMO, S. I.; EIJSINK, V. G. H. Growth of *Lactobacillus plantarum* in media containing hydrolysates of fish viscera. **Journal of Applied Microbiology**, v. 99, n. 5, p. 1082-1089, 2005.

[31] HOYLE, N. T.; MERRLTT, J. H. Quality of fish protein hydrolysates from herring *(Clupea harengus*). **Journal of Food Science**, v. 59, n. 1, p. 76-79, 1994.

[32] ILLERA-VIVES, M. et al. Evaluation of compost from seaweed and fish waste as a fertilizer for horticultural use. **Scientia Horticulturae**, v. 186, p. 101-107, 2015.

[33] Instrução Normativa MAPA nº 30, de 12 de novembro de 2010, sobre **métodos oficiais para análise de inoculantes, sua contagem, identificação e análise de pureza**. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacoes. Acesso: 02 jul. 2024.

[34] KARIM, N. U.; LEE, M. F. M. A.; ARSHAD, A. M. The effectiveness of fish silage as organic fertilizer on post-harvest quality of pak choy (*Brassica rapa* L. subsp. chinensis). **European International Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 5, p. 163-174, 2015.

[35] KORKMAZ, K.; TOKUR, B. Otimização das condições de hidrólise para produção de hidrolisados proteicos a partir de resíduos de pescado utilizando metodologia de superfície de resposta. **Biociência Alimentar**, v. 45, p. 101312, 2021.

[36] KUMAR, S. **Textbook of microbiology**. JP Medical Ltd, 2012.

[37] KURBANOGLU, E. B.; ALGUR, O. F. Use of ram horn hydrolysate as peptone for bacterial growth. **Turkish Journal of Biology**, v. 26, n. 2, p. 115-123, 2002.

[38] LOWRY, O. H. et al. Medição de proteínas com o reagente fenol Folin. **Journal of Biological Chemistry**, v. 1, pág. 265-275, 1951.

[39] MEZZOMO, V. G.; SILVA, M. E. Geração de Resíduos sólidos industriais: Uma revisão para indústria de processamento de pescado. III Sustentare – **Seminários de Sustentabilidade da PUC – Campinas**. Disponível em: https://www.sustentarewipis.com.br/wp-content/uploads/artigos/2021/440411.pdf. Acesso em: 31 de maio de 2024.

[40] NAJAFIAN, L.; BABJI, A. S. A review of fish-derived antioxidant and antimicrobial peptides: Their production, assessment, and applications. **Peptides**, v. 33, n. 1, p. 178-185, 2012.

[41] NASCIMENTO, A. J. S.; DENADAI, M. S. Piscicultura no Brasil. **Tekhne e Logos**, v. 15, n.1, p. 15-24, 2024.

[42] NASRI, Rim et al. ACE inhibitory and antioxidative activities of Goby (*Zosterissessor ophiocephalus*) fish protein hydrolysates: Effect on meat lipid oxidation. **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 552-561, 2013.

[43] OGAVA, L. E. et al. Physical and Chemical Characterization of Chicken Viscera Hydrolysate: Nutritional Information for Nile Tilapia Diets. **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, n. 2, p.599-614, 2024.

[44] OLSEN, R. L.; TOPPE, J.; KARUNASAGAR, I. Challenges and realistic opportunities in the use of by-products from processing of fish and shellfish. **Trends in Food Science & Technology**, v. 36, n. 2, p. 144-151, 2014.

[45] PASUPULETI, V. K.; BRAUN, S. State of the art manufacturing of protein hydrolysates. **Protein hydrolysates in biotechnology**, p. 11-32, 2010

[46] PEIXE BR. Associação Brasileira de Piscicultura. **Anuário 2024.** Disponível em: https://www.peixebr.com.br/anuario-2024/. Acesso em: 30 de maio de 2024.

[47] PELCZAR JUNIOR, M. J. et al. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. In: Microbiologia: conceitos e aplicações. 1996.

[48] PINTO, B. V. et al. O resíduo de pescado e o uso sustentável na elaboração de coprodutos. **Revista Mundi Meio Ambiente e Agrárias**, v. 2, n. 2, 2017.

[49] PLEISSNER, D.; VENYS J. Utilization of protein-rich residues in biotechnological processes. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 100, p. 2133-2140, 2016.

[50] POWER, D. A.; JOHNSON, J. A. Difco™ & BBL™ manual. **Manual of Microbiological Culture Media**, v. 359, p. 60, 2009.

[51] ROBALO, S. S. et al. Review Enzymatic hydrolysats of fish by-products: technological advantages and bioactive properties. **Ciência Rural**, v. 54, n. 08, p. e20230523, 2024.

[52] SAFARI, R. et al. Use of hydrolysates from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) heads as a complex nitrogen source for lactic acid bacteria. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, p. 73-79, 2012.

[53] SANTOS, M. C. et al. Nutritive value of sugarcane silage treated with chemical additives. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 159-163, 2009.

[54] SARMADI, B. H.; ISMAIL, A. Antioxidative peptides from food proteins: A review. **Peptides**, v. 31, n. 10, p. 1949-1956, 2010.

[55] SHARMA, S.; SINGH, R.; RANA, S. Bioactive peptides: a review. **International Journal Bioautomotion**, v.15, n. 4, p. 223-250, 2011.

[56] SHI, S.; LI, J.; BLERSCH, D. M. Utilization of solid catfish manure waste as carbon and nutrient source for lactic acid production. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 102, p. 4765-4772, 2018.

[57] SWANEPOEL, J. C.; GOOSEN, N. J. Evaluation of fish protein hydrolysates in juvenile African catfish (*Clarias gariepinus*) diets. **Aquaculture**, v. 496, p. 262-269, 2018.

[58] TACON, A. G. J.; LEMOS, D.; METIAN, M. Peixe para a saúde: melhoria da qualidade nutricional do peixe cultivado para consumo humano. **Resenhas em Fisheries Science & Aquaculture**, v. 28, n. 4, p. 449-458, 2020.

[59] TAVANO, O. L. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, v. 90, p. 1-11, 2013.

[60] TOLDRÁ, F.; MORA, L.; REIG, M. New insights into meat by-product utilization. **Meat science**, v. 120, p. 54-59, 2016.

[61] TORRES, R. C. O. **Utilização de água de coco verde (*Cocos nucifera* L.) na composição de meios para cultura de *Escherichia coli***. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos.

[62] TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. Microbiologia. 10. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.

[63] VALENTE, B. S. et al. Compostagem na gestão de resíduos de pescado de água doce. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 40, n. 1, p. 95-103, 2014.

[64] VILLAMIL, O.; VÁQUIRO, H.; SOLANILLA, J. F. Fish viscera protein hydrolysates: Production, potential applications and functional and bioactive properties. **Food chemistry**, v. 224, p. 160-171, 2017.

[65] WAGNER, Y. G.; COELHO, A. B.; TRAVASSOS, G. F. Análise do consumo domiciliar de pescados no Brasil utilizando dados da POF 2017-2018. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, p. e250494, 2023.

[66] WANG, L. et al. Isolation and identification of novel antioxidant and antimicrobial oligopeptides from enzymatically hydrolyzed anchovy fish meal. **Process Biochemistry**, v. 74, p. 148-155, 2018.

Capítulo 9

Integração de insumos biológicos e adjuvantes na agricultura

Regina Neves Ubial Costa[1]
Reginaldo Ferreira Santos[2]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[3]

Resumo: Insumos biológicos tem se tornado uma alternativa sustentável para agricultura, como biofertilizantes, bioestimulantes e agentes de controle biológico. Sendo assim, reduzindo o impacto ambiental com o uso controlado de agroquímicos. Além de promover o desenvolvimento das plantas, a saúde do solo e do controle de pragas e doenças. No entanto, para uma maior efetividade dos insumos biológicos, alguns fatores ambientais podem influenciar, entre eles, a temperatura, umidade e as características das plantas e do solo. O objetivo do presente traz uma abordagem metodológica que constituiu na pesquisa de artigos relacionados à atividade de insumos biológicos associados aos adjuvantes, publicados entre os anos de 2019 e 2024, nas plataformas científicas SciELO e Google Scholar. O objetivo principal da pesquisa foi destacar as principais atividades dos adjuvantes, sendo eles aditivos adicionados as caldas associadas aos insumos biológicos como alternativa de eficiência de ingrediente ativo, reduzindo a perca e principalmente os impactos ambientais.

Palavras-chave: Controle biológico. Tensoativo. Sustentabilidade.

[1] Laboratório Multiusuário de Tecnologías Sustentáveis (LABTES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0009-0000-5360-1342
[2] Laboratório Multiusuário de Tecnologías Sustentáveis (LABTES)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-7745-9173
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da população ano a ano, consequentemente a demanda por alimentos também aumenta, sugerindo um aumento de cerca de 50% da produtividade agrícola até o ano de 2050. E devido a preservação ambiental, a expansão da agricultura é limitada em poucas áreas cultiváveis. Como alternativa para promover uma eficácia na produtividade dos alimentos os agroquímicos desempenham um papel importante para promover o aumento da produtividade dos alimentos (Arora, 2018).

Com a expectativa de suprir essa demanda, pesquisas e tecnologias têm sido e incorporadas à pulverização, visando otimizar a aplicação correta de defensivos agrícolas, e entre elas tem se ressaltado o uso dos adjuvantes agrícolas. Sendo assim, adjuvantes são compostos, adicionados às formulações ou à calda de pulverização, trazendo benefícios como aumento no molhamento, na aderência, no espalhamento, na redução de espuma e na dispersão da calda de pulverização (Sasaki *et al.*, 2014).

A transformação e o crescimento do setor agropecuário brasileiro nas últimas décadas são bem representativos. O Brasil passou de um país importador de alimentos para se estabelecer como um dos maiores produtores e exportadores de commodities agrícolas. Vários fatores contribuíram para essa mudança, entre os quais podemos citar, o investimento em pesquisa, o desenvolvimento da infraestrutura e os fatores climáticos e ambientais favoráveis (Xavier, 2022).

Segundo Rocha; Alves; Melido (2019) os primeiros relatos de uso dos adjuvantes foram no início do século XVIII, que desde então vem sendo utilizado para melhorar a prática e promover a eficiência da atividade biológica por meio das alterações físicas e química da calda de aplicação agrícola.

Devido esse aumento da produção, o consumo de fertilizantes químicos também está relacionado e consequentemente associado a impactos ambientais. A exemplo de fertilizantes fosfatados e nitrogenados têm gerado problemas relacionados à lixiviação, como eutrofização de rios e lagos. Com o uso da ureia, cujo é o principal fertilizante nitrogenado em uso no mundo, é responsável por apresentar emissões consideráveis de gases como o óxido nitroso (N_2O), um gás do efeito estufa e catalisador da degradação do ozônio estratosférico (Rocha, 2021).

Como a prática de uso direta desses fertilizantes podem causar problemas, bem como a sua produção geram impactos significativos. Sendo assim, esses problemas têm motivado a adoção de práticas agronômicas mais sustentáveis, passando pela utilização de biofertilizantes e inoculantes microbianos. O que significa que o consumo desses bioinsumos vem crescendo nos últimos 15 anos, com um mercado no Brasil de aproximadamente 45 milhões de doses de inoculante líquido e 10 milhões de doses de inoculante sólido (Florencio *et al.*, 2022). Existem algumas associações nacionais que fazem o acompanhamento anual desses produtos disponíveis no mercado, realizam análises estatísticas quanto a utilização de inoculantes microbianos e que possuem informações bastante abrangentes relacionadas ao uso de diferentes tipos de bioinsumos para nutrição vegetal no Brasil (Florencio *et al.*, 2022).

Pode-se dizer que atualmente, diversos tipos de microrganismos são aplicados na agricultura com diferentes funções. A exemplo dos gêneros de bactérias *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, que são os mais utilizados para a fixação de nitrogênio atmosférico, aplicados principalmente em soja (Hungria; Campo; Mendes, 2001). Dados mostram que aproximadamente 78% da área plantada no Brasil (36,5 milhões de hectares) utiliza

atualmente o inoculante microbiano para fixação de N, substituindo assim a aplicação da ureia. A exemplo dos microrganismos como o fungo *Aspergillus niger* e a bactéria *Bacillus subtilis* podem ser utilizados como inoculantes para solubilização de fósforo e outros nutrientes presentes no solo (Silva, 2022).

Para o controle de fitopatógenos presentes no solo, utiliza-se o fungo *Trichoderma harzianum*. No entanto, a ampliação do uso dos inoculantes microbianos é limitada por questões relacionadas à reduzida viabilidade e tempo de prateleira desses produtos. Um levantamento feito para produtos comerciais a base de agentes de biocontrole de doenças de plantas no Brasil, realizado em 2012, apontou apenas 135 produtos disponíveis no mercado. Atualmente, o número desse tipo de produto registrado chega a um total de 411, sendo 95 registrados no ano de 2020 (Florencio *et al.*, 2022).

Pesquisa relacionadas ao desenvolvimento de estratégias de formulação abre possibilidades de melhorar a qualidade e a preservação das cepas, além de propor novas formas de aplicação do inoculante no campo. Recentemente, estudos demonstram diferentes rotas para o desenvolvimento de novos sistemas de biofertilizantes a partir de biocompósitos, num conceito de *biorreator em grânulos (*Florencio *et al.*, 2022). Com essa nova estratégia, pode permitir o fornecimento de nutrientes a partir da solubilização de fontes de baixa reatividade, ou melhorar a qualidade de inoculantes aplicados em sementes, buscando maiores tempo de prateleira (De Oliveira *et al.*, 2014).

Insumos biológicos são produtos ou processos para uso na agricultura que contêm organismos vivos, desenvolvidos a partir de enzimas, extratos de plantas ou de microrganismos, macroorganismos (invertebrados), metabólitos secundários e feromônios, destinados ao controle biológico. Esses insumos são também os ativos voltados à nutrição, os promotores de crescimento de plantas, os mitigadores de estresses bióticos e abióticos e os substitutivos de antibióticos. Com o objetivo de melhorar a saúde das plantas, a produtividade agrícola e a sustentabilidade do solo (Ormond, 2006).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MICRORGANISMOS

A parte biológica é um dos principais componentes do solo. Essa fração é composta por comunidades de pequenos animais (mesofauna) e microrganismos (microfauna e microflora). Onde muitas das propriedades dos solos são decorrentes da atividade biológica, sendo comum dizer se que um solo sem atividade biológica é um solo sem vida. As relações e interações entre as diferentes comunidades de organismos do solo contribuem para a manutenção da vida do solo, e para diversos outros processos que, por sua vez, estão intimamente ligados à cadeia trófica (Araujo; Hungria, 1994).

Os microrganismos benéficos são objeto de estudos dos pesquisadores da Embrapa e instituições parceiras, como a Universidade Federal de Goiás (UFG), que identificaram fungos e bactérias denominados agentes biológicos promotores de 9 crescimento, que podem melhorar a eficiência às condições climáticas e indutores de resistência às principais doenças e pragas das culturas o arroz e do feijão entre outras (Magalhães, 2020).

Os microrganismos incluem bactérias, fungos e outros organismos que, ao interagirem com as plantas e o solo, promovem o crescimento vegetal, melhoram a absorção de nutrientes e protegem as plantas contra pragas e doenças. Como exemplo das Rizobactérias promotoras de crescimento (PGPRs) e fungos micorrízicos (Bomfim, 2016).

2.2. BIOINSUMOS

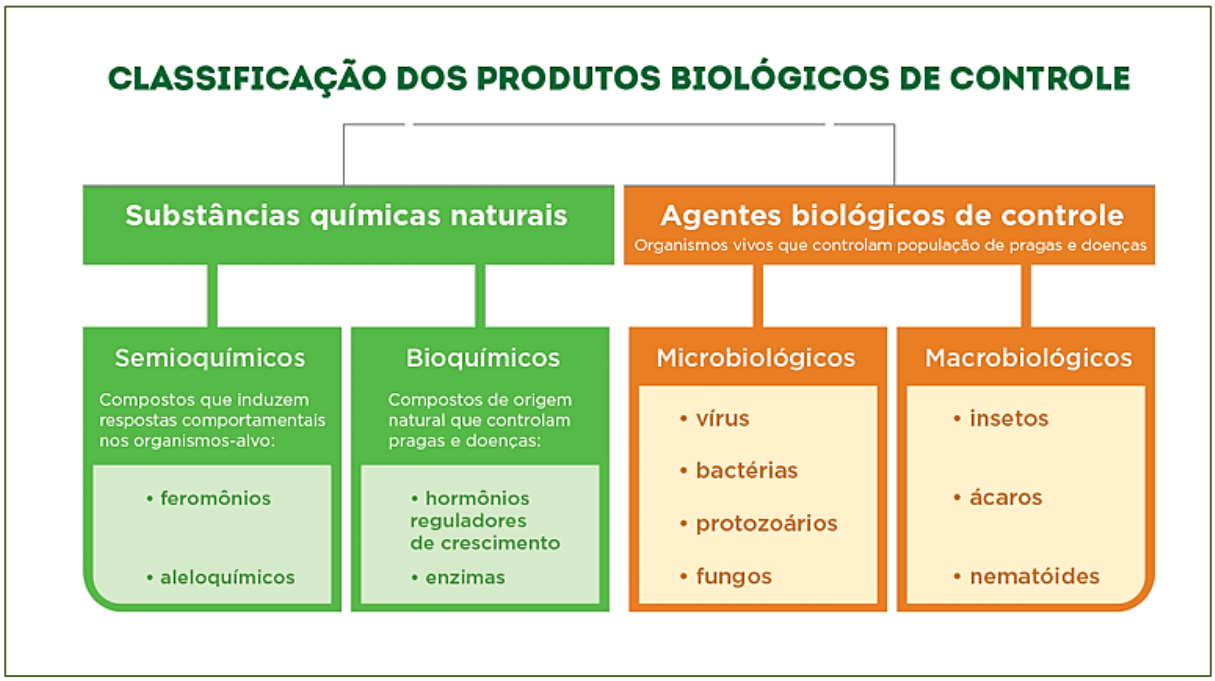
O crescimento do setor agrícola e agropecuário no país levou a uma grande transformação. Tornou o Brasil de um país importador de alimentos para se estabelecer como um dos maiores produtores e exportadores de comodities agrícolas (Gonçalves, 2017). E vários fatores contribuíram para essa mudança, entre eles, o investimento em pesquisa, o desenvolvimento da infraestrutura e os fatores climáticos e ambientais favoráveis (Xavier, 2022).

O uso inadequado de agroquímicos trouxeram alguns fatores relevantes como obstáculo para os produtores e consumidores brasileiros, como alto custo financeiro, efeitos agressivos a saúde e meio ambiente. Sendo o Brasil um significativo produtor de alimentos, e para garantir uma oferta de alimentos, surge o desafio e a necessidade de garantir uma oferta de alimentos que utilize cada vez menos insumos químicos e cada vez mais uma solução biológica e sustentável. Desta forma atender a expectativa de reduzir os agroquímicos e caminhar ao encontro das demandas do consumidor e do mercado nacional e internacional (Vidal, 2021).

Entre os diversos tipos de bioinsumos disponíveis, destacam-se os produtos biológicos utilizados no controle de pragas e doenças na agricultura. Esses produtos podem incluir agentes macrobiológicos, como ácaros, insetos e nematoides; microbiológicos, como vírus, bactérias e fungos; semioquímicos, como feromônios; bioquímicos, como hormônios; e fitoquímicos, de origem vegetal. Todos esses são considerados ativos biológicos e compõem a formulação de 11 diferentes produtos voltados para a produção, armazenamento e beneficiamento na agricultura, conforme demonstra a figura 1.

Biofertilizantes são produtos que contêm microrganismos vivos capazes de melhorar a disponibilidade e a eficiência de nutrientes no solo. Eles auxiliam na fixação de nitrogênio, solubilização de fósforo e decomposição da matéria orgânica, a exemplo os Inoculantes à base de *Rhizobium* para leguminosas (Meyer, 2022).

Figura 1 Classificação dos produtos biológicos.



Fonte: CropLife Brasil (2021).

Os Biopesticidas são os agentes de controle biológico usados para combater pragas e doenças de plantas. Esses produtos são menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana quando comparados a pesticidas químicos, exemplo os *Bacillus thuringiensis* (Bt), utilizado para o controle de insetos (Meyer, 2022).

Bioestimulantes são substâncias ou microrganismos que, quando aplicados às plantas, promovem maior crescimento e resistência ao estresse. Eles atuam em processos metabólicos, como aumento da absorção de nutrientes e resistência à seca, temos o exemplo de produtos à base de algas marinhas e ácidos húmicos (Meyer, 2022).

2.3. ADJUVANTES

Os adjuvantes são produtos que melhoram o desempenho e a eficiência dos agroquímicos, promovendo a melhoria da ação física e química do que será aplicado na área destinada à produção. Além disso, quando adicionados com os fungicidas, os adjuvantes apresentam significativa melhoria na eficiência do controle de pragas e doenças, e quando adicionados com herbicida, o aumento da concentração do adjuvante há um acréscimo de eficiência na retenção do produto (Rocha; Alves; Melido, 2019).

É estimado que doenças, insetos e plantas invasoras possam reduzir a produção de 30 a 40% de todas as culturas produzidas no mundo, em média (Amorim, 1997). Fatores ambientais e climáticos estão entre as causas que podem favorecer a proliferação de algumas doenças, sendo que, dependendo do nível de infestação, os danos causados poderão comprometer à cultura, e o seu controle apresentará baixa eficiência, onde promove a secagem rápida das plantas e o aumento da uniformidade de maturação, o que facilita a colheita com menor teor de impurezas e sementes de melhor qualidade, além de reduzir perdas e os custos de secagem (Pelin *et al*., 2020).

Segundo Mendonça; Raetano; Mendonça (2007) os óleos minerais e os óleos vegetais são de grande uso na formulação dos adjuvantes. Sendo utilizados puros para o controle de inseto e fungos, ou como adjuvantes adicionados a inseticidas, auxiliam no controle de cochonilhas e ácaros e quando associados aos fungicidas e para o controle de plantas daninhas adicionados a herbicidas. No seu emprego de adjuvante, os óleos contribuem para o espalhamento e a absorção, o que reduz o excesso de ingrediente ativo e a tensão superficial.

Sendo assim, os adjuvantes podem ser classificados em algumas nomenclaturas, a exemplo dos surfactantes que tem a propriedade de reduzir a tensão superficial da solução, facilitando a dispersão uniforme do produto sobre a superfície das plantas. Eles melhoram a cobertura das folhas e ajudam a solução a espalhar-se por áreas mais amplas, exemplo o Nonilfenol etoxilado (Santos, 2024).

Os que tem a função de espalhantes facilitam a distribuição uniforme da solução sobre as superfícies foliares, permitindo que o produto cubra melhor a planta, inclusive áreas de difícil acesso, como partes inferiores das folhas. Eles são especialmente úteis em plantas com folhas cerosas ou hidrofóbicas a exemplo dos organossiliconados (Torres, 2009).

Os adjuvantes que possuem a propriedade adesivos melhoram a aderência do produto à superfície das plantas, evitando que o agroquímico seja lavado pela chuva ou irrigação. Esses adjuvantes garantem que o produto permaneça por mais tempo na planta, aumentando sua eficácia com o exemplo dos polímeros sintéticos (Silva, 2013).

Adjuvantes com a função de penetração auxiliam na penetração dos agroquímicos através da cutícula ou das paredes celulares das plantas. Esses adjuvantes são cruciais para produtos sistêmicos, que precisam ser absorvidos pelas plantas para alcançar seu local de ação, exemplo dos óleos vegetais e minerais. (Santos, 2024).

Com a ação umectantes, a solução aplicada sobre as superfícies retem a umidade, garantindo que o produto permaneça ativo por mais tempo, especialmente em climas secos ou durante o período de secagem da calda. Isso aumenta a eficiência de produtos que precisam de contato prolongado com a planta, exemplo a glicerina (Bernardo *et al.*, 2004).

Segundo Rocha (2023) esses adjuvantes, quando corretamente selecionados e utilizados juntamente com os biológicos, maximizam a eficácia dos tratamentos agrícolas e ajudam a reduzir o uso de produtos químicos, promovendo uma agricultura mais eficiente e sustentável. A integração entre insumos biológicos e adjuvantes é uma estratégia promissora para aumentar a eficácia dos tratamentos agrícolas e promover a sustentabilidade. Essa sinergia potencializa os benefícios de cada componente, otimizando o controle de pragas, o crescimento das plantas e a saúde do solo.

Ainda de acordo com Silva (2013) os microrganismos benéficos, como os biopesticidas e bioestimulantes podem ser mais eficazes quando aplicados com adjuvantes adequados, aumentando a eficiência desses insumos. Adjuvantes como surfactantes e espalhantes ajudam a distribuir uniformemente os produtos biológicos na planta, aumentando o contato com as superfícies vegetais e o solo, e maximizando a absorção e colonização dos microrganismos.

Adjuvantes como adesivos melhoram a aderência e a persistência, assim garantem que os microrganismos e biopesticidas permaneçam por mais tempo nas superfícies das plantas, resistindo à lavagem pela chuva ou irrigação. Isso prolonga a ação dos insumos

biológicos e permite que eles tenham mais tempo para exercer suas funções, como controlar patógenos ou promover o crescimento radicular (Silva, 2013).

Segundo Tavares (2024) agentes de penetração facilitam a penetração e absorção do ingrediente ativo e permitem que bioestimulantes e microrganismos entrem mais facilmente nas plantas ou se infiltrem no solo, onde podem atuar com mais eficiência. Isso é especialmente importante para produtos que precisam alcançar o interior das células ou atuar em camadas mais profundas do solo.

2.4. MECANISMOS DE AÇÃO

2.4.1. COMPETIÇÃO POR NUTRIENTES

Microrganismos benéficos competem diretamente com patógenos no ambiente, disputando os recursos essenciais para seu crescimento e reprodução. Esses microrganismos consomem nutrientes, como carbono, nitrogênio e minerais, que, de outra forma, seriam utilizados pelos patógenos, limitando a capacidade destes de se estabelecerem e causarem doenças. É um exemplo as bactérias do gênero *Bacillus* competem com fungos patogênicos por ferro, utilizando sideróforos que sequestram o mineral, tornando-o indisponível para os patógenos (Gouveia, 2018).

Muitos microrganismos benéficos produzem compostos que são tóxicos para patógenos, inibindo seu crescimento ou causando sua morte. Essas substâncias podem ser antibióticos, enzimas degradativas, compostos voláteis ou toxinas. A presença desses compostos no ambiente proporciona um controle biológico eficiente e diminui a dependência de pesticidas químicos. A Exemplo do fungo *Trichoderma spp.* que produz enzimas como quitinases e glucanases, capazes de degradar a parede celular de fungos fitopatogênicos (Gouveia, 2018).

Microrganismos benéficos promovem o crescimento das plantas de várias maneiras, seja por meio da fixação de nitrogênio atmosférico, solubilização de fósforo, ou pela produção de hormônios vegetais, como auxinas, citocininas e giberelinas. Além disso, eles podem melhorar a estrutura do solo, facilitando a absorção de água e nutrientes pelas plantas. As rizobactérias promotoras de crescimento (PGPRs), como *Azospirillum spp.*, fixam nitrogênio atmosférico, tornando-o disponível para plantas não leguminosas, e produzem fitohormônios que estimulam o crescimento das raízes (Pimenta, 2022).

Muitas vezes, um único insumo biológico atua em múltiplos desses mecanismos simultaneamente. Por exemplo, um microrganismo pode competir por nutrientes, produzir substâncias antimicrobianas e induzir resistência sistêmica na planta, oferecendo uma proteção integrada e eficaz. Esses mecanismos tornam os insumos biológicos ferramentas poderosas na agricultura sustentável, oferecendo uma abordagem menos agressiva ao meio ambiente e aos ecossistemas agrícolas, ao mesmo tempo que ajudam a reduzir o uso de produtos químicos sintéticos (Bettiol *et al.*, 2009).

A combinação desses adjuvantes com insumos biológicos cria uma sinergia que maximiza a eficiência das aplicações agrícolas. A correta escolha e uso de adjuvantes garantem que os insumos biológicos permaneçam viáveis e eficientes, mesmo sob condições ambientais desafiadoras. Além disso, ao melhorar a dispersão, adesão, penetração e persistência, os adjuvantes reduzem o desperdício de produto e aumentam a eficácia das práticas agrícolas, promovendo uma agricultura mais sustentável e de alta performance (Roel, 2002).

2.4.2. ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÕES NA AGRICULTURA

Bacillus thuringiensis (Bt) é uma bactéria que produz proteínas tóxicas para diversas espécies de insetos, especialmente larvas de borboletas (Lepidoptera). Ao ser ingerida pelas pragas, a toxina de Bt causa paralisia no intestino do inseto, levando-o à morte. Ele também é amplamente utilizado em culturas como milho, soja e hortaliças. Quando combinado com adjuvantes, a efetividade do biopesticida é prolongada, o que reduz a necessidade de reaplicações (Simonato *et al.*, 2014).

Trichoderma harzianum é um fungo que age como antagonista de patógenos de plantas, como *Fusarium* e *Rhizoctonia*, por meio de vários mecanismos: produção de enzimas líticas, competição por nutrientes e espaço, e parasitismo direto do patógeno. Quando usados com adjuvantes umectantes e adesivos. Os umectantes mantêm a umidade da solução no solo ou nas folhas, prolongando a viabilidade dos esporos de *Trichoderma*. Os adesivos garantem que o fungo permaneça fixado nas áreas de aplicação por mais tempo, mesmo sob condições adversas. Usado em culturas como tomate, pepino e pimentão beneficiam-se da aplicação de *Trichoderma*, combinado com adjuvantes para aumentar sua eficácia na proteção contra fungos patogênicos de solo (Bettiol *et al.,* 2012).

Paecilomyces lilacinus é um fungo que parasita ovos e formas juvenis de nematoides, reduzindo as populações dessas pragas no solo. É usado para o controle de nematoides que atacam culturas como soja, cana-de-açúcar e hortaliças. Quando usados com adjuvante agentes de penetração auxiliam na penetração garantem que o fungo chegue às camadas mais profundas do solo, onde os nematoides estão presentes, maximizando o contato do fungo com as pragas. Aplicado em culturas afetadas por nematoides, como soja e hortaliças, a aplicação de *Paecilomyces lilacinus* com adjuvantes de penetração melhora a eficiência no controle das pragas subterrâneas (Dias Neto, 2014).

O óleo de neem é um biopesticida de origem vegetal que age como inseticida natural, interferindo na alimentação, crescimento e reprodução de pragas. Ele é eficaz no controle de insetos como pulgões, mosca-branca e lagartas. Quando usado com adjuvante de ação surfactante, sua função é reduzir a tensão superficial da solução de neem, ajudando a espalhar uniformemente o óleo na superfície das folhas e penetrar nas partes mais difíceis de serem alcançadas, como sob as folhas e nos ramos. O extrato de neem é utilizado em diversas culturas, como hortaliças, frutíferas e grãos, e sua ação é potencializada com surfactantes, que melhoram a cobertura foliar e, assim, aumentam a eficácia no controle de pragas (Maciel, 2010).

Bacillus subtilis é uma bactéria que controla doenças foliares e de solo causadas por fungos patogênicos. Ela atua por competição por nutrientes, produção de substâncias antimicrobianas e indução de resistência nas plantas. Quando adicionado adjuvante espalhastes e adesivos a sua função garante que a bactéria se distribua de maneira uniforme nas folhas e hastes das plantas. Adesivos melhoram a aderência, protegendo a bactéria da lavagem e garantindo uma ação mais prolongada contra patógenos. Aplicado em culturas de hortaliças e frutas, *Bacillus subtilis* é aplicado para proteger contra doenças fúngicas como oídio e míldio. O uso de adjuvantes garante uma cobertura mais eficiente e prolonga a ação do biopesticida biológico (Porto, 2016).

2.4.3. SOBRE A COMPATIBILIDADE

Para Mazaro *et al.* (2022) a compatibilidade entre insumos biológicos (como microrganismos benéficos, biofertilizantes, biopesticidas e bioestimulantes) e os diferentes tipos de adjuvantes é uma questão crucial para o sucesso das práticas agrícolas que buscam maximizar a eficiência e sustentabilidade. A interação entre esses dois componentes pode determinar a viabilidade e a eficácia dos insumos biológicos, pois alguns adjuvantes podem comprometer a sobrevivência dos organismos vivos ou a atividade dos compostos bioativos.

Microrganismos benéficos utilizados em insumos biológicos, como bactérias (*Bacillus*, *Rhizobium*, *Azospirillum*), fungos (*Trichoderma*, *Paecilomyces*), e outros agentes de controle biológico, são sensíveis a variações de pH, agentes químicos e condições físicas alteradas pelos adjuvantes (Siqueira *et al*., 1994).

Para Bettiol *et al*. (2012) alguns surfactantes podem alterar a membrana celular dos microrganismos, afetando sua viabilidade. Adjuvantes com propriedades oxidantes ou que geram radicais livres podem ser prejudiciais, levando à morte dos microrganismos. Adjuvantes de Agentes penetração, dependendo de sua composição, podem ser tóxicos para certos microrganismos, especialmente quando usados em concentrações elevadas. A exemplo do uso de adjuvantes agressivos com *Trichoderma* ou *Bacillus thuringiensis* pode reduzir sua eficácia ao comprometer a viabilidade dessas culturas microbianas, diminuindo o controle sobre patógenos ou pragas.

Siqueira *et al.* (1994) afirmam que o pH da solução de pulverização é um fator crítico para a estabilidade de muitos insumos biológicos. Microrganismos vivos ou compostos bioativos (como extratos vegetais e biofertilizantes) têm uma faixa de pH ideal para sobrevivência ou atuação. Alguns adjuvantes, como acidificantes ou alcalinizantes, podem alterar significativamente o pH da solução de pulverização. Um pH muito ácido pode inativar microrganismos benéficos ou degradar compostos biológicos, enquanto um pH muito alcalino pode desestabilizar substâncias bioativas. Temos o exemplo de biofertilizantes à base de *Rhizobium*, que fixam nitrogênio, tendem a ser sensíveis a pHs extremos, especialmente em soluções ácidas. A adição de adjuvantes que ajustam o pH deve ser feita com cuidado para não prejudicar a atividade biológica.

Adjuvantes à base de óleos ou emulsões podem não se misturar adequadamente com biofertilizantes solúveis em água, resultando em formulações instáveis. Incompatibilidades físicas, como formação de grumos ou precipitados, podem ocorrer, tornando a solução de pulverização ineficaz ou até mesmo prejudicial à planta. Com o exemplo o uso de adjuvantes oleosos com biofertilizantes solubilizadores de fósforo pode criar incompatibilidades, resultando em precipitação e perda de eficiência do insumo biológico (Bettiol, 2012).

Adjuvantes umectantes podem ajudar a manter os microrganismos ativos por mais tempo, proporcionando um ambiente úmido e adequado para sua sobrevivência. E os adjuvantes voláteis ou que secam rapidamente podem desidratar os microrganismos, reduzindo sua eficácia. Exemplo umectantes podem ser combinados com biofertilizantes à base de *Azospirillum* para prolongar a viabilidade dos microrganismos aplicados no solo, garantindo uma colonização mais eficaz da rizosfera (Florencio, 2022).

Morzelle *et al*. (2017) afirmam que o uso simultâneo de insumos biológicos e adjuvantes junto com pesticidas químicos pode gerar interações negativas. Certos pesticidas podem ser tóxicos para os microrganismos presentes nos biofertilizantes ou

biopesticidas. Adjuvantes projetados para aumentar a penetração de pesticidas sistêmicos podem acabar introduzindo compostos químicos diretamente nas células microbianas, inativando-os. E, que em alguns casos, adjuvantes podem reagir quimicamente com pesticidas, comprometendo tanto a eficácia do produto químico quanto do biológico.

3. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica, por basear-se trabalhos publicados anteriormente. Entende-se também que se trata de uma pesquisa exploratória e descritiva, pois visa explorar publicações anteriores sobre o tema estudado, e a partir dessas análises, descrever o tema. Para a realização do estudo foram adotadas as seguintes metodologias:

No *Google* Acadêmico o buscador apresentou 19.700 mil de resultados para a descrição principal, insumos biológicos. Após inserir a descrição secundária, adjuvantes agrícolas, os resultados caíram para 467 mil. O próximo passo foi se adicionar os filtros de busca, desde 2020 o que resultou em e a ocorrência de palavras no título do artigo resultando em 220 documentos.

Após um refinamento observando o título, assim excluindo 162 arquivos, restaram 58 trabalhos para serem analisados manualmente. Após a etapa manual excluíram-se mais 24 documentos, de modo que a base de dados final foi composta por 34 artigos. Foram estes que compuseram o trabalho todo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pesquisas demonstram que a utilização de bioinsumos e a combinação com adjuvantes agrícolas representa uma abordagem inovadora e promissora para a agricultura moderna. Bioinsumos, como microrganismos benéficos, extratos vegetais e outros produtos naturais, contribuem para a melhoria da saúde do solo, aumento da resistência das plantas a doenças e promoção do crescimento vegetal sustentável. Quando aplicados juntamente com adjuvantes, que são substâncias que melhoram a eficácia dos tratamentos, esses produtos podem maximizar seu impacto positivo.

Os adjuvantes agrícolas desempenham um papel crucial ao melhorar a adesão, penetração e eficácia dos bioinsumos. Eles podem aumentar a disponibilidade de nutrientes, otimizar a aplicação dos bioinsumos e garantir uma distribuição mais uniforme dos produtos. Isso pode levar a uma melhor assimilação dos bioinsumos pelas plantas e ao aumento geral da produtividade e da saúde das culturas.

No entanto, para garantir o sucesso dessa abordagem, é essencial considerar a seleção adequada de bioinsumos e adjuvantes, bem como suas interações específicas. Estudos contínuos e avaliações práticas são necessários para ajustar as formulações e métodos de aplicação a diferentes contextos agrícolas e condições ambientais.

Em resumo, a integração de bioinsumos com adjuvantes agrícolas oferece uma oportunidade significativa para promover uma agricultura mais eficiente, sustentável e resiliente. Esta combinação não apenas melhora o desempenho das culturas, mas também contribui para a preservação dos recursos naturais e a redução do impacto ambiental, alinhando-se com os princípios da agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS

[1] ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Microrganismos de importância agrícola. Brasília: **EMBRAPA-SPI**, 1994.

[2] ARORA, N. K. Environmental Sustainability—necessary for survival. **Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 1-2, 2018.

[3] BETTIOL, W.; et al. (2012). **Produtos comerciais à base de agentes de biocontrole de doenças de plantas**. EMBRAPA. Disponível em: < Produtos comerciais à base de agentes de biocontrole de doenças de plantas. - Portal Embrapa >. Acesso em 06/09/2024.

[4] BETTIOL, W., MORANDI, M. A.; MORANDI, M. A. B. (2009). **Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009.

[5] BOMFIM, C. A. **Biofertilizante Hortbio®: Características microbiológicas e efeito na qualidade da alface**. 2016. xi, [147] f., il. Dissertação (Mestrado em Biologia Microbiana) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

[6] DE OLIVEIRA, A. L. M. et al. Aplicações da biodiversidade bacteriana do solo para a sustentabilidade da agricultura. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. *3*, n. 1, p. 56-77, 2014.

[7] DIAS NETO, J. A. (2014). Associação e compatibilidade de produtos químicos e os fungos Trichoderma harzianum e Paecilomyces lilacinus no manejo de fitonematóides na cultura da soja.

[8] FLORENCIO, C. et al. Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável. **Química Nova**, n.*45*, p. 1133-1145, 2022.

[9] GONÇALVES, H. M. S. **Avaliando as perspectivas e dificuldades do agronegócio brasileiro**. 2017. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal - Pb, 2017.

[10] GOUVEIA, C. K. **Seleção e avaliação de bactérias do gênero bacillus com potencial probiótico para uso na carcinicultura**. 2018. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

[11] HUNGRIA, M**.** et al. **Fixacao Biologica do Nitrogenio na cultura da soja.** Brasília - Df: Embrapa, 7 mar. 2001.

[12] MACIEL, M. V. et al. Atividade inseticida in vitro do óleo de sementes de nim sobre *Lutzomyia longipalpis* (*Diptera: Psychodidae*). **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, n. 19, p. 07-11, 2010.

[13] MAGALHÃES, H. **Agricultura nas mãos de microrganismos benéficos**. Embrapa, 2020. em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/ 27 /noticia/51405622/agricultura-nas-maos-de-microrganismos-beneficos. Acesso em: 12 de set. 2024.

[14] MEYER, M. C. et al. Bioinsumos na cultura da soja. In: MAZARO, S. M. et al. **Desafios na adoção de bioinsumos.** Londrina: Embrapa Soja, 2022. Cap. 4. p. 75-84.

[15] MEYER, E. et al. **Aplicação de Inoculantes Microbianos em Espécies Herbáceas Empregadas na Revegetação de Áreas de Mineração de Carvão em Recuperação**. 2022. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

[16] MORZELLE, M. C. et al. Agroquímicos estimulantes, extratos vegetais e metabólitos microbianos na agricultura. **Série produtor rural**, n. 63, 2017.

[17] ORMOND, J. G. P. Glossário de termos usados em atividades agropecuárias, florestais e ciências ambientais/José Geraldo Pacheco Ormond. – Rio de Janeiro : BNDES, 2006 316 p. ; 23 cm.

[18] PIMENTA, L. S*. et al.* **Rizobactérias da Bacaba *(Oenocarpus bacaba* Mart.) tolerância ao alumínio e potencial como promotoras do crescimento de plantas**. 2022. 69 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia., Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Am, 2022.

[19] PORTO, B. L. et al. **Avaliação do potencial de controle biológico da mancha marrom de alternaria com *Trichoderma* spp., *Bacillus subtilis* e fertilizante organomineral**. 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

[20] ROCHA, A.; ALVES, G. S.; MELIDO, R. C. N. Avaliação do uso de adjuvantes na cultura da soja. **Anais do 1° Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma**, p. 16-29, 2019.

[21] ROCHA, C. G. et al. **Desenvolvimento, calibração e aplicação de novas metodologias analíticas para medidas das emissões de amônia e óxidos de nitrogênio provenientes do solo adubado**. 2021. 60 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química., Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2021.

[22] ROCHA, T. M. et al. **Síntese microbiana de bioestimulantes de crescimento vegetal para aplicação na agricultura**. 2023. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena Sp, 2023.

[23] ROEL, A. R. et al. A agricultura orgânica ou ecológica e a sustentabilidade da agricultura. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, Campo Grande, v. 3, n. 4, p. 57-62, mar. 2002.

[24] SANTOS, T. F. **Adjuvantes agrícolas e seus componentes: uma revisão bibliográfica.** 2024. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Mg, 2024.

[25] SASAKI, R. S. et al. Adjuvantes nas propriedades físicas da calda, espectro e eficiência de eletrificação das gotas utilizando a pulverização eletrostática físicas da calda, espectro e eficiência de eletrificação das gotas utilizando a pulverização eletrostática. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 274-279, 2014.

[26] SILVA, A. C. A. et al. **Desempenho de adjuvantes na qualidade da aplicação e na retenção e translocação de fungicida na cultura da soja**. 2013. 67 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Botucatu - Sp, 2013.

[27] SILVA, P. V. **Caracterização e uso de formulação de biofertilizante à base de *Aspergillus niger*.** 2022, 64 páginas. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil

[28] Simonato, J. et al. **Controle biológico de insetos-praga na soja**, Tecnologia & Produção, Fundação MS, Maracaju. Available, p. 178–193,2014.

[29] SIQUEIRA, J. O. et al. **Microrganismos e processos biológicos do solo**: perspectiva ambiental. Brasilia: Embrapa, 1994. 142 p. (IV).

[30] TAVARES, R. C. **Sistemas agrícolas sustentáveis: manejo por produtores de soja de Rio Verde**, Goiás. 2023. 118 f., il. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

[31] TORRES, F. Z. V. et al. **Traslocação do inseticida tiametoxam no floema de mamoneira e cafeeiro**. 2009. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia/Entomologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras -Mg, 2009.

[32] VIDAL, M. et al. Bioinsumos: a Construção de um Programa Nacional pela Sustentabilidade do Agro Brasileiro. **Economic Analysis of Law Review**, v. 12, n. 3, p. 557-574, 2021.

[33] XAVIER, V. L. et al. **Programa nacional de bioinsumos: proposição de um sistema de monitoramento de biofábricas**. 2022. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado Profissional em Avaliação e Monitoramento de Políticas Públicas, Escola Nacional de Administração Pública – Enap, Brasília - Df, 2022.

Capítulo 10

Perspectivas do uso de produtos naturais e da manipulação da disponibilidade de recursos do solo no controle de plantas daninhas em agroecossistemas

Victor Manuel Lustoza Rotta[1]
Roberto Luis Portz[2]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[3]

Resumo: O crescimento na produtividade em áreas de cultivo está diretamente atrelado ao aumento na utilização de insumos agrícolas no sistema produtivo, em especial o uso intensivo de herbicidas, empregados no controle de plantas daninhas. Contudo, devido a algumas características associadas a estes produtos, com relação aos riscos à saúde e ao ambiente, bem como pelo aumento da demanda por tecnologias e processos mais sustentáveis e ambientalmente corretos, surgem incentivos às pesquisas que exploram o potencial de novas estratégias de controle deste tipo de plantas, por meio de abordagens ecológicas, empregando produtos e processos naturais, em substituição aos herbicidas convencionais. Nesse sentido, a aplicação de produtos alelopáticos, obtidos a partir de plantas, bem como, a manipulação de recursos do solo, surgem como ferramentas em potencial a serem incorporadas a um manejo integrado de plantas daninhas em agroecossistemas.

Palavras-chave: Alelopatia. Carbono. Fertilização reversa. Manejo integrado de plantas daninhas.

[1] Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-2367-9744
[2] Departamento de Ciências Agronômicas (DCA)/ Universidade Federal do Paraná (UFPR)/ Palotina–PR https://orcid.org/0000-0002-1568-7330
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas o Brasil passou por uma verdadeira revolução no setor rural, experimentando modificações tecnológicas profundas e a expansão de sua fronteira agrícola. Graças a este incremento na sua produtividade, hoje o país desponta como um dos líderes globais na produção e exportação de alimentos, principalmente de grãos e de proteína de origem animal (Thomaz Júnior, 2017; Gaboardi; Candiotto; Panis, 2023).

Contudo, a produtividade e rentabilidade estão intimamente relacionadas com o aumento do uso de insumos agrícolas, em especial dos pesticidas, de modo que o país hoje figura como líder no ranking internacional, seguido dos Estados Unidos e da Indonésia, como os maiores consumidores de defensivos agrícola do planeta (FAO, 2021).

Segundo o levantamento realizado por Gaboardi, Candiotto e Panis (2023), o consumo de pesticidas no Brasil apresentou um crescimento de 125%, entre o período de 2009 a 2020, sendo Mato Grosso, São Paulo e Paraná as unidades federativas que apresentaram os maiores volumes (em tonelada) comercializados no ano de 2022 (IBAMA, 2022).

Os pesticidas empregados na agricultura incluem uma ampla gama de compostos, com diferentes modos de ação e de organismos alvos (Gaboardi; Candiotto; Ramos, 2019). Os herbicidas representam uma categoria de pesticidas que atuam sobre plantas popularmente conhecidas como “daninhas”, diminuindo sua incidência ou eliminando-as, para que não compitam por recursos, como água e nutrientes, com as culturas de interesse econômico (Gaboardi; Candiotto; Panis, 2023). Segundo dados do IBAMA (2022), os herbicidas lideram como a categoria de pesticida mais comercializada no país, movimentando um total de 492,35 mil toneladas no ano de 2022.

Todavia, como as comunidades de plantas daninhas são repetidamente expostas à ação dos herbicidas, muitas delas acabam desenvolvendo resistência a estes agentes químicos, através da seleção e consequente perpetuação de genótipos resistentes (Costa *et al.*, 2018; Albrecht *et al.*, 2020). Deste modo, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento e aprimoramento de métodos de controle alternativos, seja através da aplicação de produtos naturais e menos agressivos ambientalmente, assim como pela incorporação de métodos que aproveitem a biologia do solo, em um manejo integrado eficaz dessas plantas em agroecossistemas (Vencill *et al.*, 2017; Gannett *et al.*, 2024b).

Os produtos e os processos biológicos constituem uma alternativa potencial aos pesticidas sintéticos, apresentando como principais vantagens os menores riscos ao meio ambiente e a saúde humana, e podem ser baseados na aplicação e/ou prospecção de extratos naturais ou da prospecção e purificação de compostos isolados de organismos vivos, tais como microrganismos, fungos, algas, plantas e animais (Moraes, 2016).

Os produtos biológicos, ou bioinsumos, podem ser definidos como bens provenientes de organismos vivos ou seus derivados, empregados como ingredientes ativos em suas formulações (Mondin *et al.*, 2022). Os processos biológicos, por sua vez, dizem respeito aos processos mediados por seres vivos no desenvolvimento de suas atividades ao longo do processo de interação entre eles e o ambiente (Siqueira *et al.*, 1994; Oliveira *et al.*, 2016)

Neste sentido, a utilização de extratos provenientes de plantas com efeito alelopático tem se configurado como uma possibilidade promissora no controle de plantas daninhas, representando uma oportunidade real de pesquisa e desenvolvimento de novos compostos bioativos de interesse agrícola (Rosa; Bobrowski; Freitag, 2023).

Ao mesmo tempo, métodos baseados na dinâmica microbiana do solo têm-se mostrado uma ferramenta em potencial a ser integrada nos métodos de controle dessas plantas indesejadas no campo, por meio da manipulação da disponibilidade de recursos no solo e a consequente alteração da disponibilidade dos nutrientes para essas plantas (Gannett *et al.*, 2024c).

A modificação das proporções carbono:nitrogênio do solo (C:N), por meio da incorporação de corretivos com elevado teor de carbono, é uma técnica que tem sido empregada com considerável sucesso, em pesquisas de restauração florestal em habitats perturbados com espécies de plantas exóticas invasoras. O excesso de carbono adicionado ao sistema atuará como um impulsionador do crescimento microbiano, afetando os processos de mineralização e imobilização microbiana, impactando assim a nutrição das plantas, devido principalmente ao aumento da taxa de imobilização temporária de nitrogênio nas células dos microrganismos (Schimel e Bennett, 2004; Sinsabaugh *et al.*, 2013; Gannett *et al.,* 2024c).

De acordo com Gannett *et al* (2024c), esta estratégia de manejo apresenta grande potencial de aplicação em agroecossistemas que são frequentemente dominados por espécies de plantas daninhas responsivas ao nitrogênio. Em função da vantagem competitiva que essas plantas apresentam, em termos de eficiência no uso do N, quando comparadas com as culturas de interesse agrícola, os solos com elevada densidade destas plantas podem ocasionar uma diminuição do rendimento agrícola (Little *et al.*, 2021).

Deste modo, práticas de manejo que promovam uma alteração no N disponível no solo podem resultar em impactos promissores no controle dessas populações indesejadas de plantas, uma vez que, se o processo de imobilização microbiana ocorrer durante o período crítico de controle das plantas daninhas, a diminuição temporária de N inorgânico resultará em uma diminuição de sua ocorrência e desenvolvimento (Mohler; Teasdale; DiTommaso, 2021).

Nesse contexto, a presente revisão bibliográfica visou discorrer acerca do potencial de novas estratégias de controle de plantas daninhas, por meio de abordagens ecológicas, empregando produtos naturais e alterações na disponibilidade de recursos do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BIOLOGIA DAS PLANTAS DANINHAS

As plantas daninhas, também referidas como ervas daninhas, plantas espontâneas, ruderais, ou simplesmente “mato”, podem ser definidas no âmbito agrícola como qualquer vegetal que interfere negativamente, de modo direto ou indireto, na capacidade produtiva das culturas de interesse, reduzindo significativamente sua produtividade (Fontes; Gonçalves, 2009). Estas plantas compõem uma ampla e heterogênea gama de espécies, que se caracterizam pela sua indesejabilidade no ambiente, sob a perspectiva das atividades humanas (Brighenti; Oliveira, 2011).

O fato é que as plantas daninhas se encontram justamente onde o ser humano está e onde desenvolve as suas atividades, visto que as próprias alterações que a espécie humana provoca, propiciam o desenvolvimento de um ambiente adequado para o estabelecimento destas espécies.

A história evolutiva das plantas daninhas está intimamente relacionada com o advento da agricultura. Segundo Brighenti; Oliveira (2011), a domesticação e o melhoramento realizados pelos seres humanos das plantas de interesse agrícola acarretaram uma gradativa diminuição de sua agressividade e rusticidade para sobrevivência natural, de maneira que esses sistemas agrícolas se tornaram suscetíveis aos efeitos do estabelecimento das plantas silvestres.

2.2. PLANTAS DANINHAS NO AMBIENTE DE CULTIVO

Como vimos, o advento da agricultura e as modificações ambientais provocadas pelo ser humano ao longo do tempo moldaram o cenário evolutivo deste grupo de plantas. A ação antrópica está intimamente relacionada com os processos de dispersão e ocupação do ambiente pelas plantas daninhas, por meio de seu papal de facilitador para a colonização de novas áreas, por meio da introdução de espécies exóticas, que muitas vezes, acabam exibindo características invasoras e se tornando uma planta daninha em determinado agroecossistema (Carvalho, 2013).

Para os ambientes agrícolas, os prejuízos decorrentes do estabelecimento de plantas daninhas em meio às culturas de interesse econômico são relatados por diversos autores, estando a diminuição da produtividade no ambiente de cultivo relacionada, principalmente, com práticas de manejo e controle inadequados destes organismos (Cury *et al.*, 2013; Barbosa, 2018).

Quando em convivência com plantas daninhas no campo, têm-se relatos de prejuízos de até 57% na produtividade do feijoeiro, 10% de redução no potencial produtivo da cultura da soja e até 65% de redução na produtividade do milho (Cardoso *et al.*, 2010; Gantoli; Ayala; Gerhards, 2013; Lage *et al.*, 2017).

Segundo Pereira *et al*. (2011), diversos aspectos relacionados à biologia das plantas daninhas as tornam altamente competitivas com as culturas agrícolas. Muitas destas espécies possuem sementes com elevadas concentrações de reserva, proporcionando um alto potencial germinativo, impactando assim a eficiência dos métodos de controle.

Soma-se a isso, o fato de que algumas destas espécies, após a emergência, apresentam um crescimento bastante agressivo e relativamente acelerado, ocupando grandes espaços na lavoura e em elevadas densidades, muitas vezes apresentando rebrota, mesmo após a remoção de sua parte aérea. Outras plantas, por sua vez, ainda apresentam a capacidade de germinação e desenvolvimento mesmo em estações desfavoráveis, dadas suas características de rusticidade e adaptabilidade ambiental (Pereira *et al*. 2011).

Todavia, nem sempre estas plantas devem ser vistas como inimigas, visto que algumas espécies apresentam características benéficas associadas ao seu estabelecimento, quando realizado um manejo adequado em campo. A ocupação e cobertura do solo, com consequente proteção contra a erosão por agentes físicos, é um dos aspectos positivos do estabelecimento destas plantas espontâneas que convém citar (Nolla *et al.*, 2018).

Além disso, a deposição dessa camada vegetal sob o solo, após o processo de controle destas espécies, leva a criação de uma camada morta de matéria orgânica, que pode melhorar as características microclimáticas do solo, através de retenção da umidade e da proteção contra a insolação em excesso (Nolla *et al.*, 2018). Ademais, a deposição dessa camada vegetal, que pode aqui ser referida como uma "adubação verde", é capaz ainda de ser uma ferramenta útil no controle de novas plantas daninhas, seja através do efeito físico sobre o solo ou pela ação química, por meio da liberação de substâncias com potencial alelopático, como será abordado com mais detalhes mais à frente.

Deste modo, em um manejo eficiente de plantas daninhas em agroecossistemas deve-se sempre considerar os aspectos biológicos destas espécies, seus impactos associados, bem como possíveis efeitos positivos que a incorporação de sua biomassa poderá promover ao solo (Barbosa *et al.*, 2020).

2.3. MÉTODOS DE CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Ao longo da história da agricultura foram desenvolvidas diversas técnicas para lidar com o desenvolvimento destes organismos no campo, visando diminuir sua ocorrência, e consequentemente, minimizar os prejuízos associados à sua presença. Neste sentido, antes de discorrer acerca da abordagem dos diferentes métodos, é fundamental realizar a distinção entre controle e manejo de plantas daninhas.

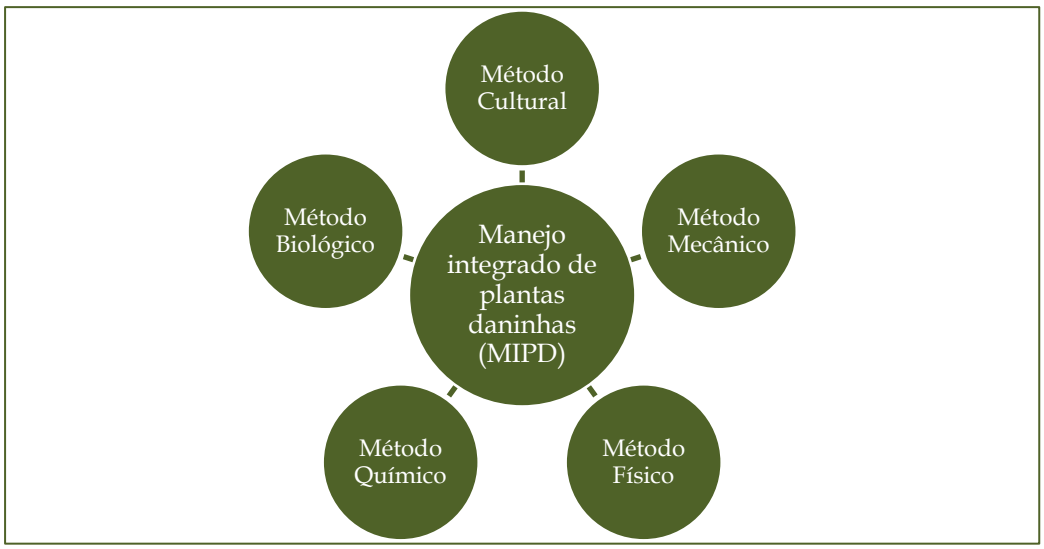
Os métodos de controle dizem respeito as diferentes técnicas que visam limitar a ocorrência e o desenvolvimento destas plantas. O manejo, por sua vez, refere-se à combinação de dois ou mais métodos de controle, desde técnicas preventivas até corretivas (Barroso *et al.*, 2022).

Um sistema de manejo satisfatório deve considerar as adequações necessárias às diferentes especificidades observadas em campo, não havendo, deste modo, um modelo único a ser implementado, fazendo-se necessário a incorporação de diferentes métodos (Cardoso *et al.*, 2024).

Neste sentido, o manejo integrado de plantas daninhas (MIPD) pode ser implementado como uma ferramenta de controle eficaz para esses organismos, minimizando deste modo os impactos ambientais associados ao uso excessivo de herbicidas, por meio da incorporação de diferentes métodos, inclusive de natureza biológica (Figura 1).

O MIPD baseia-se na integração de diferentes métodos de controle, mesclando práticas preventivas e corretivas, e que podem fazer uso de métodos de natureza cultural, mecânica, física e biológica, muitas vezes em conjunto com o método químico, de maneira a permitir a redução do uso de herbicidas sintéticos, ao mesmo tempo que se cria um ambiente desfavorável ao desenvolvimento das plantas indesejadas (Nunes; Trezzi; Debastiani, 2010).

Figura 1 Métodos de controle de plantas daninhas em um manejo integrado.



Fonte: Adaptado de Sausen *et al.* (2020).

Os métodos de controle cultural são aqueles que se baseiam no manejo e nas características da própria cultura, visando aumentar a competitividade desta em relação as plantas daninhas, por meio de técnicas como o uso de variedades mais competitivas, o uso de culturas de cobertura, plantio com estreitamento do espaçamento e elevação da densidade das plantas, dentre outras (Carvalho, 2013).

Já as medidas mecânicas, por sua vez, são aquelas que fazem uso de algum instrumento de corte ou arranque das plantas indesejadas, sendo a roçada e a capina (manual ou mecânica) alguns dos métodos mais utilizados (Constantin, 2011; Carvalho, 2013).

Os métodos físicos, por outro lado, são distinguidos dos mecânicos por fazerem uso de determinada influência de um agente físico sobre o desenvolvimento das plantas, como o uso de inundações em culturas irrigadas como o arroz, bem como o uso de cobertura morta sobre o solo, ocasionando uma diminuição da luminosidade disponível, bem como uma limitação do próprio espaço livre (Cardoso *et al.*, 2024).

Os métodos de natureza química são aqueles que se baseiam na aplicação de produtos químicos sintéticos, em concentrações que impactem negativamente os processos fisiológicos e bioquímicos essenciais ao desenvolvimento e sobrevivência das plantas daninhas, retardando seu crescimento ou mesmo ocasionando sua morte (Constantin, 2011; Biffe; Constantin; Oliveira Junior, 2018). Trata-se do principal método empregado no controle dessas plantas no campo, contudo, o uso intensivo de tais substâncias induz a seleção de biótipos resistentes (Vencill *et al.*, 2017).

Quando analisamos a história da agricultura podemos constatar que é relativamente recente a aquisição e utilização de produtos químicos realmente eficientes no controle desses organismos, de modo que até então o controle era realizado através de uma série de técnicas, que naquele momento e sistema produtivo, eram suficientes (Constantin, 2011). De fato, segundo Constantin (2011), os herbicidas químicos devem ser encarados como a solução final no controle de plantas daninhas, devendo haver um resgate da diversificação dos métodos de manejo, implicando, consequentemente em uma maior eficiência no campo e na redução de custos na aquisição de insumos.

A utilização intensiva e indiscriminada destes compostos na agricultura moderna pode representar um risco ambiental e sanitário, levando a impactos como a contaminação e degradação ambiental, danos à saúde humana, danos a microbiota do solo, bem como selecionar biótipos de plantas resistentes, de maneira que se torna cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas tecnologias menos agressivas ambientalmente e que também apresentem resultados satisfatórios de controle no campo (Chaud *et al.*, 2021).

Por fim, as medidas biológicas podem ser definidas como todas aquelas que empregam inimigos naturais capazes de reduzir a população das plantas daninhas e, deste modo, interferir na capacidade de competição com as plantas de interesse agrícola (Carvalho, 2013; Sausen *et al.*, 2020).

Dada a crescente demanda por métodos mais sustentáveis e menos agressivos ambientalmente, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de métodos de controle biológicos, que sejam baseados na ecologia das espécies e que permitam a diminuição do uso intensivo e da grande dependência dos produtos químicos sintéticos, ao mesmo tempo que se mostrem uma alternativa viável e eficiente (Gannett *et al.*, 2024b).

2.4. MÉTODOS DE BASE BIOLÓGICA

Os métodos biológicos apresentam como principais vantagens menores riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Podem ser implementados através da aplicação de compostos naturais obtidos através de extratos ou da prospecção e purificação de compostos isolados de diferentes organismos vivos, além disso podem utilizar a própria ecologia das espécies, através do controle biológico e do aproveitamento da atividade dos microrganismos do solo (Moraes, 2016; Gannett *et al.*, 2024c).

2.4.1. ALELOPATIA NA AGRICULTURA

A utilização de espécies com potencial alelopático tem despertado o interesse no setor agrícola nos últimos tempos, se mostrando uma possibilidade promissora no controle de plantas daninhas no ambiente agrícola, podendo complementar métodos tradicionais de manejo e minimizar assim o uso de herbicidas (Rosa; Bobrowski; Freitag, 2023).

A alelopatia pode ser definida como uma interação química entre plantas, seja ela benéfica ou maléfica, por meio da liberação, para o ambiente, de substâncias produzidas no metabolismo secundário do vegetal, influenciando assim a dinâmica do crescimento de plantas vizinhas (Carvalho *et al.*, 2011).

Os aleloquímicos podem interferir no metabolismo vegetal de diversas maneiras, positiva ou negativamente, nas diferentes fases de vida da planta. O potencial fitotóxico dessas substâncias pode se traduzir através da inibição da germinação das sementes, pelo aumento do estresse oxidativo nos tecidos da planta alvo, bem como pela ruptura das membranas celulares e por mecanismos específicos de inibição em rotas metabólicas do organismo, atuando como inibidores de fotossíntese ou desreguladores da respiração (Kaur *et al.*, 2021).

O emprego da alelopatia pode se dar através do plantio, e posterior uso na cobertura do solo, de espécies com substâncias alelopáticas, através da chamada

adubação verde, que também desempenhará um efeito físico de cobertura sobre solo, melhorando suas características microclimáticas e biológicas (Moraes *et al.*, 2011). O método de cobertura verde destaca-se como uma ferramenta relativamente simples e capaz de controlar as plantas invasoras por meio de diferentes efeitos sobre o solo, através de mecanismos de ação física, química e biológica (Monquero *et al.*, 2009; Moraes *et al*., 2011).

Segundo Constantin (2011), deve-se ter cautela ao empregar a cobertura verde de forma intercalar com as culturas, visto que a dinâmica de competição e a ação dos aleloquímicos podem ocasionar danos que superem as vantagens desta prática de manejo. Deste modo, a decisão de se empregar ou não o uso deve ser pautada nos resultados de sistemas de consórcio com sucesso devidamente comprovado.

Para além dos efeitos alelopáticos da cobertura vegetal em campo, atualmente tem-se buscado a realização de pesquisas de prospecção a partir de extratos obtidos de plantas, representando uma oportunidade real de pesquisa e desenvolvimento de novos compostos bioativos de interesse agrícola.

É vastamente relatado na literatura o efeito alelopático de diversas espécies aplicadas no contexto agrícola. Autores como Paula *et al.* (2011), relataram que no período de pré-semeadura da soja houve uma redução da infestação da buva, de 172 plantas m^{-2} para 43 plantas m^{-2}, em decorrência do cultivo de trigo no inverno anterior e os efeitos alelopáticos associados a esta cultura. Barbosa *et al.* (2018), em seus estudos, observaram efeito alelopático dos extratos de *Pachyrhizus erosus* L. sobre as sementes de *Euphorbia heterophylla* e *Bidens pilosa*, obtendo reduções significativas da germinação destas espécies.

2.4.2. MODIFICAÇÃO DA RELAÇÃO C:N NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS

Uma abordagem ecológica que vem ganhando destaque no manejo de plantas daninhas, inicialmente em hábitats naturais perturbados, e agora em agroecossistemas, é a manipulação da disponibilidade de nutrientes do solo, por meio da imobilização microbiana de N, mediada pelo aporte de fontes de carbono no solo, sendo essa técnica denominada de “fertilização reversa” (Hopkins, 1998; Gannett *et al.*, 2024c).

A chamada “fertilização reversa” tem como objetivo a imobilização temporária de N e demais nutrientes, através do aumento das taxas de crescimento microbiano, estimuladas pela edição de compostos ricos em carbono ao solo (Perry *et al*., 2010; Gannett *et al.*, 2024c).

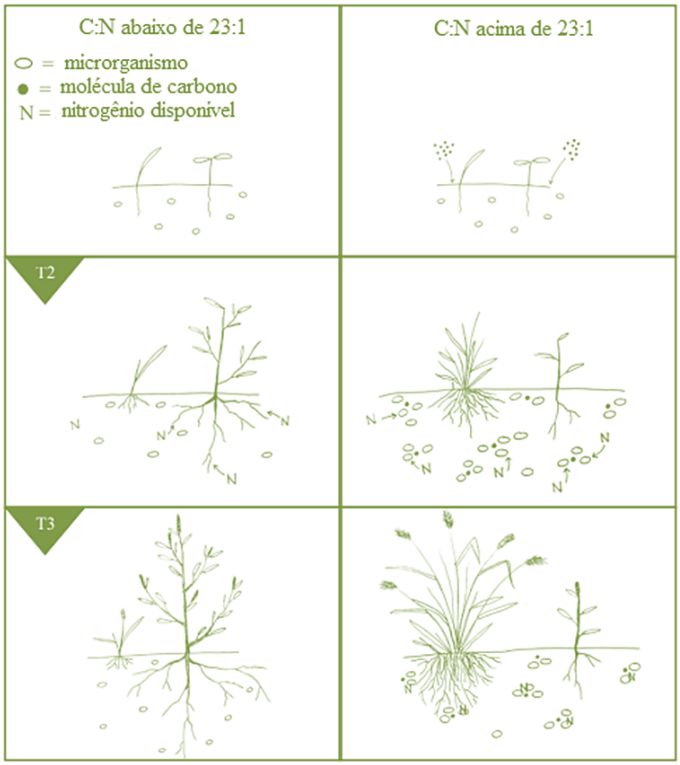
O carbono é o principal combustível para a proliferação e atividade microbiana, sendo fundamental para a geração de energia para as células, bem como para seu crescimento e síntese de biomoléculas (Sinsabaugh *et al*., 2013). Este elemento apresenta uma proporção, em comparação com outros nutrientes, necessária para o ótimo funcionamento das atividades biológicas essenciais, de modo a permitir o balanceamento estequiométrico quanto ao crescimento microbiano (Mooshammer *et al*., 2021). Para a relação carbono: nitrogênio esta proporção varia em torno de 23:1 (C:N) (Schneider; Amelung; Don, 2021).

Em solos com uma baixa relação C:N o crescimento microbiano é limitado pelo carbono, contudo, em situações de elevada proporção C:N, o nitrogênio passa a ser

limitante, de maneira que há um estímulo a imobilização microbiana deste nutriente disponível no solo (Sinsabaugh *et al.*, 2013).

Embora varie de maneira significativa, em geral, os solos agrícolas apresentam uma relação C:N em torno de 15:1, o que é relativamente baixa considerando a relação estequiométrica de ambos os elementos na manutenção das atividades microbianas no solo (23:1). Contudo, essa proporção pode ser modificada através da adição de corretivos com elevado teor de carbono, tais como palhada, serragem, ou mesmo sacarose, promovendo a imobilização microbiana do N e reduzindo a disponibilidade deste nutriente, de maneira temporária, para as plantas.

Figura 2 Ilustração da dinâmica competitiva das plantas sob fertilização reversa. Na coluna à esquerda é representado o crescimento das plantas em solos não corrigidos, e as imagens na coluna da direita representam o crescimento de plantas em solos alterados com elevado teor de carbono. Dentro de cada caixa, a planta à esquerda representa uma gramínea perene de crescimento lento, enquanto a planta à direita representa uma espécie responsiva ao nitrogênio, de crescimento rápido.



Fonte: traduzido e adaptado de Gannett *et al.* (2024c).

2.4.2.1. A FERTILIZAÇÃO REVERSA NA ECOLOGIA DA RESTAURAÇÃO

O controle de plantas indesejadas, em especial de gramíneas exóticas, não é um foco de interesse apenas agrícola, mas também ambiental, visto que muitos ambientes naturais sofrem com o processo de invasão biológica por espécies vegetais exóticas agressivas, e muitos métodos convencionais de controle e manejo, como a aplicação de herbicidas sintéticos, apresentam limitações, como o efeito limitado nos propágulos depositados no banco de sementes do solo, mesmo com o uso prolongado (Brown *et al.*, 2017).

Há uma tendência global do aumento da disponibilidade de nitrogênio e outros nutrientes, provenientes das atividades antrópicas, tais como a intensificação do uso de insumos agrícolas, isso, aliado às perturbações de hábitats associadas a remoção de vegetação natural, tornam os ecossistemas sensíveis ao estabelecimento e ocupação por espécies invasoras (Galloway *et al.*, 2008).

Neste sentido, alternativas integradas de manejo têm sido propostas, incorporando o uso de técnicas convencionais, como a aplicação de herbicidas, com técnicas de manejo de solo, através de incorporação de fontes de carbono, como serragem e sacarose, que irão promover uma alteração na disponibilidade de nutrientes para as plantas exóticas no meio, através do incremento da atividade microbiana (Gannett *et al*., 2024b).

Este aumento da atividade microbiológica, estimulada pelo acréscimo de carbono, promove um aumento da absorção de nitrogênio pelos microrganismos, reduzindo a disponibilidade deste elemento para as plantas daninhas exóticas (Perry *et al.*, 2010).

A Tabela 1 traz um levantamento de estudos que empregam a correção de carbono no solo como uma ferramenta na restauração de habitats perturbados por espécies vegetais invasoras, listando também o tipo de fonte de carbono utilizada nos estudos, sua respectiva quantidade e a localidade e contexto no qual o estudo foi realizado.

Tabela 1 Estudos em ecologia de restauração de habitats perturbados com espécies vegetais invasoras, empregando a técnica de correção de carbono do solo.

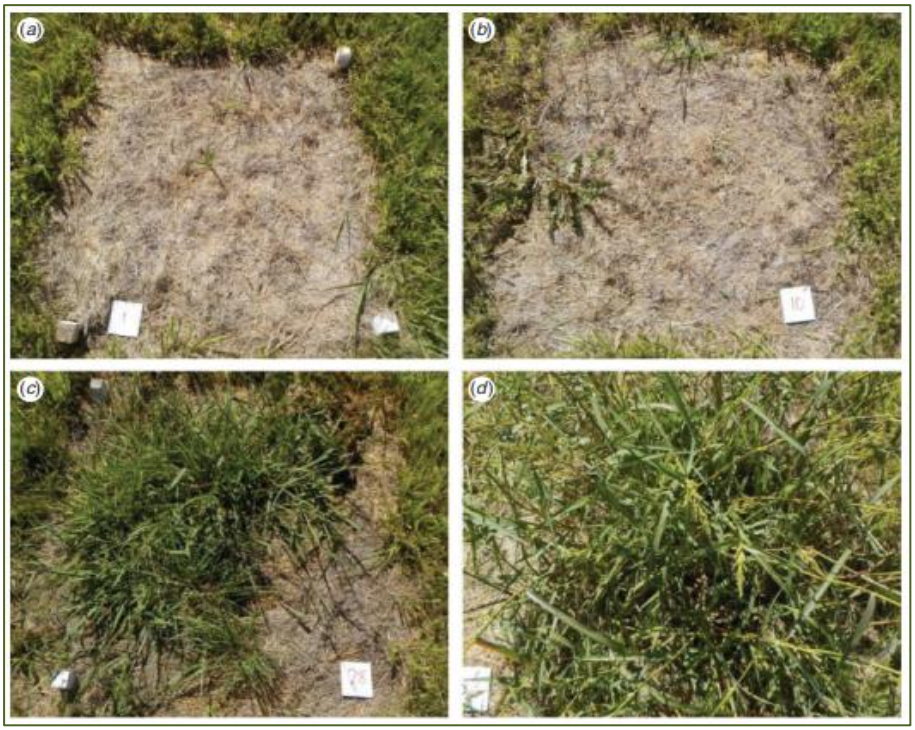
Autores	Fonte de carbono	Quantidade de carbono (kg C ha^{-1} ano^{-1})	Localidade
Morgan (1994)	Serragem e sacarose	8.400 kg de açúcar + 80 L serragem	Pradarias no Manitoba, Canadá
Corbin e D'Antonio (2004)	Serragem	2340	Pastagens costeiras na Califórnia (EUA)
Prober *et al.* (2005)	Sacarose	8400	Florestas gramadas de Nova Gales do Sul, Austrália
Eschen *et al.* (2007)	Sacarose ou aparas de madeira e Serragem	4400 – 6600 ou 9500 – 11000	Campos agrícolas abandonados na Suíça e o Reino Unido
Mazzola *et al.* (2008)	Sacarose	1500	Pradarias de Nevada (EUA)
Brunson *et al.* (2010)	Sacarose	0 – 2400	Estepes no noroeste dos EUA
Yelenik *et al*. (2016)	Sacarose e aparas de madeira/mistura de serragem	3500 e 2000	Florestas subtropicais no Havaí
Brown *et al.* (2017)	Serragem e sacarose	2100 e 2 cm de espessura de serragem	Florestas gramadas em Nova Gales do Sul, Austrália
Morris e Gibson-Roy (2018)	Sacarose	6300 – 42000	Ambiente florestal em Sydney, Austrália
Uddin *et al.* (2020)	Carvão ativado de casca de coco	70 g L^{-1} substrato	Em casa de vegetação
Cole *et al*. (2021)	Sacarose e serragem	3.000 – 4.050 e 1.050 – 4.050	Ecossistema de matagais e florestas tropicais úmidas no Havaí
Knauf *et al*. (2021)	Sacarose e serragem	Carbono suficiente para atingir uma proporção de C:N acima de 35	Solo de ecossistema de floresta tropical úmida e seca, Havaí (em casa de vegetação)

Com base nos dados da Tabela 1 é possível constatar que os estudos de fertilização reversa utilizando fontes de carbono no solo já foram bem relatados na área de ecologia da restauração, com trabalhos como o de Morgan (1994), empregando serragem e sacarose em um processo de empobrecimento temporário do solo na recuperação de pradarias no Canadá, afetando o crescimento e desenvolvimento das espécies invasoras mais sensíveis a disponibilidade de nitrogênio do solo.

Brown *et al.* (2017), em seus estudos de controle de gramíneas exóticas invasoras em ecossistemas naturais no estado de Nova Gales do Sul (Austrália), obtiveram um incremento da eficiência no controle dessas espécies, por meio da aplicação de glifosato consorciado com a incorporação de serragem e açúcar como fontes de carbono para a microbiota do solo. Os autores observaram que a reocupação e a cobertura de plantas daninhas foram significativamente menores nas áreas em que o herbicida foi aplicado em conjunto com a correção do solo por meio da incorporação de açúcar e serragem, em comparação com as áreas em que o glifosato foi aplicado isoladamente ou com a área controle (Figura 3).

Knauf *et al*. (2021), também investigaram o potencial da manipulação de nutrientes do solo, mediada por acréscimos de carbono, em solos de florestas tropicais do Havaí, e em seu estudo destacaram a necessidade de se compreender as características individuais dentre as espécies nativas e exóticas invasoras, pois segundo os autores, é menos provável que a diminuição da disponibilidade de nutrientes no solo seja bem sucedida quando as espécies nativas e as invasoras apresentam características ecofisiológicas similares, e o mesmo vale quando se pretende dimensionar a incorporação de tal técnica de manejo em plantas de um agroecossistema.

Figura 3 Cobertura de gramíneas para tratamentos: (a) açúcar e glifosato, (b) serragem e glifosato, (c) somente glifosato e (d) controle.



Fonte: Brown *et al.* (2017).

2.4.2.2. PERSPECTIVAS DA FERTILIZAÇÃO REVERSA NA AGRICULTURA

Embora já tenha sido amplamente explorada e discutida em estudos de restauração de hábitats naturais perturbados, o processo de imobilização de nitrogênio mediado por microrganismos ainda não foi devidamente explorado no contexto agrícola.

Esta técnica de manejo dos recursos do solo apresenta grande potencial de aplicabilidade no campo, uma vez que muitas espécies de plantas daninhas de interesse agrícola são altamente responsivas ao nitrogênio (Moreau *et al.*, 2014; Little *et al.,* 2021).

Embora a imobilização microbiana de nitrogênio, mediada pela adição de carbono, ainda não tenha sido devidamente explorada de maneira isolada, a incorporação de substratos com elevada concentração de carbono no solo já é uma técnica bem conhecida e aplicada, inclusive no controle e manejo de plantas daninhas. Principalmente por meio do uso de cobertura vegetal morta, cujos efeitos de ocupação do espaço disponível, diminuição da disponibilidade de luminosidade e alelopatia já foram amplamente discutidos, porém, quase nunca analisando os efeitos da imobilização microbiana dos nutrientes em função desse aumento da atividade microbiana (Martins; Gonçalves; Junior, 2016; Siddiqui *et al.,* 2018).

Gannett *et al*. (2024a), exploraram o método de adição de carbono no controle de plantas daninhas, por meio da incorporação de feno de centeio e serragem, em campos de milho e soja, e observaram efeitos adversos. A cultura da soja, enquanto uma leguminosa fixadora de nitrogênio, não apresentou qualquer impacto negativo em seu crescimento, contudo, as plantas de milho indicaram a necessidade de aplicação de nitrogênio suplementar para suprir a falta deste nutriente imobilizado temporariamente.

Em suas pesquisas, no controle de oito espécies distintas de plantas daninhas da América do Norte, Gannett *et al.* (2024b), observaram que as plantas cultivadas em vasos com modificação de carbono (sacarose + serragem) apresentaram um retardo em sua emergência, em relação ao controle.

Todavia, para que a implementação, em larga escala, dessa técnica de manejo se torne viável é fundamental que esses modelos ecológicos sejam refinados e incorporados aos dados específicos do campo. Neste sentido, Jung *et al.* (2021), destacam o potencial de incorporação da agricultura de precisão, já largamente empregada em diversas atividades no campo, para a implementação das práticas de base ecológica.

Contudo, Coble *et al.* (2018), salientam a complexidade da natureza dos dados de cunho ecológico, destacando o desafio de se incorporar tais processos na atual agricultura de precisão. Neste sentido, tem-se direcionado esforços para o desenvolvimento e o aprimoramento de ferramentas que auxiliem na incorporação das práticas ecológicas nas atividades do campo, incluindo-se aqui a fertilização reversa, através da coleta e processamento dos dados do campo, que subsidiariam a delimitação de como a fertilização reversa seria implementada *in situ*.

Na Figura 4, Gannett *et al.* (2024c), apresentam um modelo agrícola de precisão que traz as etapas de identificação de áreas apropriadas, de modelagem dos processos ecológicos e de aplicação de fontes de carbono no manejo de fertilização reversa.

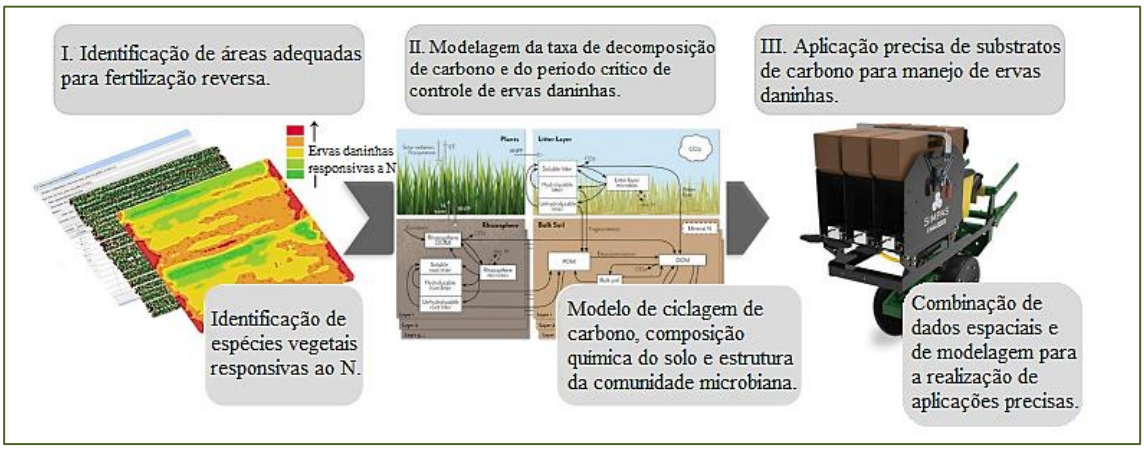
Para que esse método de manejo possa ser empregado em larga escala é fundamental que os dados do local sejam integrados aos modelos ecológicos que embasam tal aplicação. Os dados, quanto a composição do solo, devem ser combinados com os modelos preditivos de decomposição dos substratos, de maneira a garantir uma

maior adequação das aplicações de carbono e consequente sequestro de nitrogênio, durante as fases críticas de controle das espécies daninha (Robertson *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2021; Gannett *et al.,* 2024c).

Ao mesmo tempo, Gannett *et al*. (2024c), destacam a necessidade de se realizar um acompanhamento regular dos dados, quanto a composição das comunidades microbianas do solo, de maneira a compreender como a diversidade microbiana afeta as características do solo e a eficiência do uso de C adicionado.

Diante disso, os avanços nas tecnologias do campo são imprescindíveis para assegurar o sucesso da incorporação e monitoramento dos processos de base ecológica nos agroecossistemas.

Figura 4 Visão esquemática das etapas de implementação da fertilização reversa em um agroecossistema, empregando ferramentas da agricultura de precisão: I) Camadas de dados obtidos a partir de GPS, incluindo dados ambientais de solo, cultura e das plantas daninhas, indicando as áreas de ocorrência das espécies responsivas ao nitrogênio; II) Modelagem dos dados de campo para geração de cenários preditivos para o manejo de plantas daninhas; III) Tecnologia de aplicação de precisão que pode ser empregada na etapa de aplicação de corretivos de carbono, para as áreas onde prevê-se que a fertilização reversa seja eficaz.



Fonte: traduzido e adaptado de Gannett *et al*. (2024c).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos dados apresentados nesta revisão, conclui-se que o desenvolvimento e aprimoramento de métodos de manejo baseados em processos biológicos são cada vez mais necessários para reduzir a dependência de pesticidas sintéticos convencionais. O uso de produtos naturais obtidos de plantas com efeito alelopático tem sido amplamente discutido na literatura, demonstrando grande potencial para pesquisas e prospecção de compostos bioativos. Além disso, métodos convencionais, como a utilização de cobertura vegetal morta, que promove tanto o efeito alelopático quanto a melhoria das características do solo, também são eficazes no manejo sustentável.

Na busca por processos mais ecológicos e sustentáveis, a modificação dos recursos do solo, especialmente através da adição de fontes de carbono, emerge como uma

estratégia promissora no manejo integrado de plantas daninhas em agroecossistemas. A incorporação de compostos ricos em carbono estimula o desenvolvimento microbiano, imobilizando temporariamente o nitrogênio e afetando o crescimento de plantas daninhas que dependem fortemente desse nutriente.

Apesar de já amplamente explorada no contexto de restauração de habitats perturbados, a técnica de fertilização reversa ainda demanda mais estudos para elucidar completamente os mecanismos envolvidos. Isso é essencial antes de incorporar essa abordagem como uma ferramenta eficaz no manejo de plantas daninhas em ambientes agrícolas. Portanto, pesquisas adicionais são fundamentais para viabilizar a aplicação prática e segura dessas técnicas em agroecossistemas.

REFERÊNCIAS

[1] ALBRECHT, A. J. P. et al. Multiple resistance of *Conyza sumatrensis* to three mechanisms of action of herbicides. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, e42485, 2020.

[2] BARBOSA, J. A. **Alelopatia de extratos de adubos verdes no controle de plantas daninhas.** 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2018.

[3] BARBOSA, J. A. et al. Bioherbicide action of aqueous extracts of *Sorghum* sp., *Dolichos* sp. and *Pachyrhizus* sp. in pre and post-emergence. **Academia Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 4, p. 112-119, 2020.

[4] BARBOSA, J. A. et al. Allelopathy of aqueous *Pachyrhizus erosus* L. extracts on *Euphorbia heterophylla* and *Bidens pilosa.* **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 48, n. 1, p. 59-65, 2018.

[5] BARROSO, A. A. M. et al. Métodos de controle de plantas daninhas. *In*: ALMEIDA, E. I. B.; FERRÃO, G. E. **Fundamentos em biologia e manejo de plantas daninhas**. São Luis: EDUFMA, 2022. p. 82-94.

[6] BIFFE, D. F.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. Interferência das plantas daninhas nas plantas cultivadas. *In*: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. **Hortaliças - fruto** [online]. Maringá: EDUEM, 2018. p. 339-355.

[7] BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas. *In*: In: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p.1-36.

[8] BROWN, S. L. et al. Topsoil removal and carbon addition for weed control and native grass recruitment in a temperate-derived grassland in northern New South Wales. **The Rangeland Journal**, v. 39, p. 355–361, 2017.

[9] BRUNSON, J. L.; PYKE, D. A.; PERAKIS, S. S. Yield responses of ruderal plants to sucrose in invasive-dominated sagebrush steppe of the northern great basin. **Restoration Ecology**, v. 18, p. 304–312, 2010.

[10] CARDOSO, F. C. et al. O. Soybean grown in lowland rice areas to reduce weed infestation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 8, e275510, 2024.

[11] CARDOSO, G. D. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas em algodoeiro de fibra colorida 'BRS Safira'. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 456-462, 2010.

[12] CARVALHO, L. B. **Plantas daninhas**. Editado pelo autor: Lages - SC, 2013.

[13] CARVALHO, W. P. et al. Alelopatia de extratos de adubos verdes sobre a germinação e crescimento inicial de alface. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 1-11, 2011.

[14] CHAUD, M. et al. Nanopesticides in agriculture: benefits and challenge in agricultural productivity, toxicological risks to human health and environment. **Toxics**, v. 9, n. 6, p. 131. 2021.

[15] COBLE, K. H. et al. Big data in agriculture: a challenge for the future. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 40, p. 79–96, 2018.

[16] COLE, R. J. et al. Restoration benefits of soil nutrient manipulation and weeding in invaded dry and wet tropical ecosystems in Hawaii. **Restoration Ecology**, p. 1–11, 2021.

[17] CONSTANTIN, J. Métodos de manejo. *In*: In: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p. 67-78.

[18] CORBIN, J. D.; D'ANTONIO, C. M. Can carbon addition increase competitiveness of native grasses? A case study from California. **Restoration Ecology**, v. 12, p. 36–43, 2004.

[19] COSTA, N. V. et al. Resistance to Glyphosate in Populations of *Digitaria insularis*. **Planta Daninha**, v. 36, e. 018175918, 2018.

[20] CURY, J. P. et al. Eficiência nutricional de cultivares de feijão em competição com plantas daninhas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 79-88, 2013.

[21] ESCHEN, R. et al. Carbon addition alters vegetation composition on ex-arable fields. **Journal of Applied Ecology**, v. 44, p. 95–104, 2007.

[22] **FAO**. FAOSTAT: Pesticides Use. 2023. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP.

[23] FONTES, J. R. A.; GONCALVES, J. R. P. Manejo integrado de plantas daninhas. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PRAGAS, 1., 2009, Belém, PA. Manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas em grãos e fruteiras: anais. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009.

[24] GABOARDI, S. C.; CANDIOTTO, L. Z. P.; PANIS, C. Agribusiness in Brazil and its dependence on the use of pesticides. **Hygiene and Environmental Health Advances**, v. 8, p. 100080, 2023.

[25] GABOARDI, S. C.; CANDIOTTO, L. Z. P.; RAMOS, L. M. An outlineof the use of agrochemicals in southwestern Paraná (2011-2016). **Revista NERA**, v. 22, n. 46, p. 13–40, 2019.

[26] GALLOWAY, J. N. et al. Transformations of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. **Science**, v. 320, p. 889–892, 2008.

[27] GANNETT, M. A. et al. Soil C:N impacts on soil biological health and consequences on weed control in soybean and corn systems. **Weed Science**, p. 1-20, 2024a.

[28] GANNETT, M. et al. Manipulating soil resource availability to alter microbial communities for weed management in agroecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 196, 109492, 2024b.

[29] GANNETT, M. et al. Microbial nitrogen immobilization as a tool to manage weeds in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 366, 108904, 2024c.

[30] GANTOLI, G.; AYALA, V. R.; GERHARDS, R. Determination of the Critical Period for Weed Control in Corn. **Weed Technology**, Washington, v. 27, n.1, p.63-71, 2013.

[31] HOPKINS, A. A. Reverse fertilization experiment produces mixed results in semi-arid environment (Colorado). **Restoration and Management Notes**, v. 16, p. 84–85. 1998.

[32] IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2022. Relatórios de Comercialização de Agrotóxicos – 2009 a 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos.

[33] JUNG, J.; MAEDA, M. et al. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 70, p. 15–22, 2021.

[34] KAUR, P. et al. Nanoemulsion of Foeniculum vulgare essential oil: a propitious striver against weeds of Triticum aestivum. **Industrial Crops & Products**, v. 168, p. 113601, 2021.

[35] KNAUF, A. et al. Nutrient-use strategy and not competition determines native and invasive species response to changes in soil nutrient availability. **Restoration Ecology**, p. 1–11, 2021.

[36] LAGE, P. et al. Interferência do arranjo de plantas daninhas no crescimento do feijoeiro. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 3, p. 61-68, 2017.

[37] LITTLE, N. G. et al. Effects of fertility amendments on weed growth and weed crop competition: a review. **Weed Science**, v. 69, p. 132–146, 2021.

[38] MAZZOLA, M. B. et al. Effects of nitrogen availability and cheatgrass competition on the establishment of Vavilov Siberian wheatgrass. **Rangeland Ecology Management**, v. 61, p. 475–484, 2008.

[39] MOHLER, C., TEASDALE, J.R., DITOMMASO, A. **Manage weeds on your farm:** a guide to ecological strategies. Maryland: Sustain. Agric. Res. Educ. (SARE), 2021.

[40] MONDIN, M. et al. (org.). **Panorama dos Biológicos na Agricultura**. Piracicaba: PECEGE Editora, 2022.

[41] MONQUERO, P. A. et al. Effect of Green Fertilizers on the Suppression of Different Species of Weeds. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 27, n. 1, p. 85-95, 2009.

[42] MOOSHAMMER, M. et al. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon:nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. **Nature Communications**, v. 5, p. 3694, 2014.

[43] MORAES, P. V. D. et al. Allelopathy of Cover Crops on the Soil Surface or Incorporated into the Soil for *Digitaria* spp. Control. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 29, p. 963-973, 2011.

[44] MORAES, R. M. Pesticidas Naturais e Derivados de Plantas: Descobertas e Usos. *In*: HALFELD-VIEIRA, B. A. et al. **Defensivos Agrícolas Naturais:** Uso e Perspectivas, Brasília: EMBRAPA, 2016. p. 505-541.

[45] MOREAU, D. et al. The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species. **Weed Research**, v. 54, p. 335–346, 2014.

[46] MORGAN, J. P. Soil impoverishment: a little-known technique holds potential for establishing prairie. **Restoration & Management Notes**, v. 12, p. 55–56, 1994.

[47] MORRIS, E. C.; GIBSON-ROY, P. Comparison of biomass removal, nutrient manipulation and native seed addition to restore the ground layer of a degraded grassy woodland. **Australian Journal of Botany**, v. 66, p. 1–12, 2018.

[48] NOLLA, A. et al. Growth and accumulation of nutrients by weeds, in maize and legumes intercrops. **Planta Daninha**, v. 36, e. 018175433, 2018.

[49] NUNES, A. L.; TREZZI, M. M.; DEBASTIANI, C. Integrated weed management in maize cultivation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 299-304, 2010.

[50] OLIVEIRA, P. et al. Response of soil fungi and biological processes to crop residues in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 46, n. 1, p. 57-64, 2016.

[51] PAULA, J. M. et al. Manejo de *Conyza bonariensis* resistente ao herbicida glyphosate. **Planta Daninha**, v. 29, n.1, p. 217-227, 2011.

[52] PEREIRA, F. et al. **Controle de plantas daninhas em pastagens**. Embrapa Gado de Corte-Documentos (INFOTECA-E), 2011.

[53] PERRY, L. G. et al. Immobilizing nitrogen to control plant invasion. **Oecologia**, v. 163, p. 13–24, 2010.

[54] PROBER, S. M. et al. Restoring ecological function in temperate grassy woodlands: manipulating soil nutrients, exotic annuals and native perennial grasses through carbon supplements and spring burns. **Journal of Applied Ecology**, v. 42, p. 1073–1085, 2005.

[55] ROBERTSON, A. D. et al. Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model. **Biogeosciences**, v. 16, p. 1225–1248, 2019.

[56] ROSA, N. F.; BOBROWSKI, V. L.; FREITAG, R. A. Bioactivity of ethanolic and aqueous extracts of leaves and flowers *Schinus terebinthifolia* Raddi on plant bioindicator. **Scientia Plena**, v. 19, 121501, 2023.

[57] SAUSEN, D. et al. Biotechnology applied to weed management. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.5, p. 23150-23169, 2020.

[58] SCHIMEL, J. P.; BENNETT, J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. **Ecology**, v. 85, p. 591–602, 2004.

[59] SCHNEIDER, F.; AMELUNG, W.; DON, A. Origin of carbon in agricultural soil profiles deduced from depth gradients of C:N ratios, carbon fractions, $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values. **Plant Soil**, v. 460, p. 123–148, 2021.

[60] SINSABAUGH, R. L. et al. Carbon use efficiency of microbial communities: Stoichiometry, methodology and modelling. **Ecology Letters**, v. 16, p. 930–939, 2013.

[61] SIQUEIRA, J. O. et al. **Microrganismos e processos biológicos do solo:** perspectiva ambiental. Brasília: EMBRAPA – SPI, 1994.

[62] THOMAZ JÚNIOR, A. Degradação sistêmica do trabalho no negócio hidroagricultural. **Mercator (Fortaleza. Online)**, v. 16, 2017.

[63] UDDIN, M. N.; ROBINSON, R. W.; ASAEDA, T. Nitrogen immobilization may reduce invasibility of nutrient enriched plant community invaded by *Phragmites australis*. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1–16, 2020.

[64] VENCILL, W. K. et al. R. Herbicide resistance: Toward and understanding of resistance development and the impact of herbicide-resistant crops. **Weed Science**, v. 60, p. 2–30. 2017.

[65] YELENIK, S. G.; D'ANTONIO, C. M.; AUGUST-SCHMIDT, E. The influence of soil resources and plant traits on invasion and restoration in a subtropical woodland. **Plant Ecology**, v. 218, p. 1149–1161, 2016.

[66] ZHANG, Y. et al. Simulating measurable ecosystem carbon and nitrogen dynamics with the mechanistically defined MEMS 2.0 model. **Biogeosciences**, v. 18, p. 3147–3171, 2021.

Capítulo 11

Desenvolvendo soluções sustentáveis: o uso de microrganismos no controle de fitonematoides

Amanda Rafaela de Arruda[1]
Roberto Luis Portz[2]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[3]

Resumo: O controle de fitonematoides, com foco na utilização de bionematicidas, que são compostos por microrganismos, como fungos e bactérias. Esses produtos representam uma alternativa sustentável e econômica em relação aos nematicidas químicos, que são cada vez mais limitados devido a suas consequências ambientais e à saúde humana. Os fitonematoides, como *Pratylenchus brachyurus* e *Meloidogyne* spp., são parasitas que causam danos significativos em diversas culturas. Eles afetam a capacidade das plantas de absorver nutrientes e água, levando a perdas de produtividade. Os bionematicidas são uma solução promissora, consistindo em microrganismos que atuam contra nematoides. Entre os agentes mais estudados estão *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp., que demonstram eficácia na redução da população de nematoides e na promoção da resistência das plantas. No Brasil, já existem 14 bionematicidas registrados para uso agrícola, destacando-se o potencial de produtos como *Pochonia chlamydosporia* para o controle de *Meloidogyne incognita*. O capítulo tem como objetivo determinar e avaliar os gêneros de nematoides que podem ser utilizados como bioindicadores de alterações ambientais a diversidade e os principais bioinsumos utilizados.

Palavras-chave: Biodiversidade. Nematoides. Bionematicidas.

[1] Laboratório de Fitopatologia-Curso de Agronomia/ Universidade Federal do Paraná (UFPR)/ Palotina-PR/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0009-0000-5184-9141
[2] Laboratório de Fitopatologia-Curso de Agronomia/ Universidade Federal do Paraná (UFPR)/ Palotina-PR/ Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-1568-7330
[3] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel - PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

O verme do filo Nematoda são chamados de nematoides, com as lombrigas as mais comuns desse filo, sendo predominantemente aquático e pode ser encontrado em uma variedade de ambientes. Existem por volta de 80.000 espécies descritas, porém especialistas acreditam que existam muito mais. Os nematoides medem aproximadamente 0,2 a 2 mm e esses podem ser categorizados em diferentes grupos funcionais (tróficos) com base em seus hábitos alimentares em ampla gama de ambientes esses grupos incluem parasitas de plantas, parasitas de animais, fungívoros, bacteriófagos, carnívoros, onívoros (Oliveira *et al.*, 2018).

Os nematoides microbiófogos se alimentam de fungos, protozoários e bactérias, existem também os nematoides que se alimentam de pequenas minhocas ou oligoquetas, tardígrados, rotíferos ou de outros nematoides predadores e os que são parasitas de plantas superiores (Fitoparasitas), principalmente de seus órgãos subterrâneos, como por exemplo as raízes, existe os parasitas de órgãos aéreos, como por exemplo caule e frutos, possui também nematoides que são parasitas de animais, alimentam-se de vertebrados e invertebrados (Ferraz; Monteiro, 1995).

Estudos sobre a diversidade de nematoides eram escassos até a década de setenta, a grande parte dos trabalhos desenvolvidos apresentavam apenas listas de ocorrência de espécies e observações gerais em plantas e solo. Na década seguinte teve um aumento sobre o estudo de nematoides no qual utilizavam índices matemáticos e análises estatísticas variadas. No entanto o Brasil não acompanhou esses avanços relacionados ao estudo da diversidade de nematoides, sendo assim até o momento presente se tem poucos trabalhos voltados a este tema. Um estudo sobre a diversidade de nematoides deve ser classificado com o tipo de ecossistema amostrado, como por exemplo, apenas agroecossitemas, apenas ecossistemas naturais; e ecossistemas naturais e agroecossitemas (Goulart, 2002).

O manejo cultural depende integralmente do tipo de cultivo utilizado em cada atividade agrícola. Considerando que o Brasil é um país que permite o cultivo de diversas espécies sob diferentes sistemas, este assunto se torna bastante extenso, algumas das principais culturas e sistemas que pode se destacar está a cana-de-açúcar que se caracteriza pela permanência da planta por cerca de cinco anos, após os quais ocorre a reforma do canavial, o cultivo de hortaliças, que são normalmente cultivadas em sequência nos mesmos canteiros ao longo de todo o ano, e o cultivo de plantas anuais, onde a soja é a cultura predominante na safra, frequentemente seguida pelo milho ou trigo, e em certas regiões, pelo algodão. Esses sistemas mencionados anteriormente possuem como características a alta suscetibilidade aos nematoides e os prejuízos anuais vindos por meio da ocorrência destes patógenos (Dias *et al.*, 2010).

Sendo assim, o presente capítulo tem como objetivo determinar e avaliar os gêneros de nematoides que podem ser utilizados como bioindicadores de alterações ambientais a diversidade e culturas mais atingidas por nematoides, além dos principais bioinsumos utilizados em seu controle.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. NEMATOIDES COMO BIOINDICADORES DE ALTERAÇÕES AMBIENTAIS

Os primeiros registros de fitonematoides em vegetais remontam a 1743, quando o padre católico e naturalista Turbevill Needham investigava a cárie do trigo, uma enfermidade provocada por um fungo que destrói o interior do grão, preenchendo-o com esporos escuros (Moura; Maranhão, 2004).

Por não se ter o conhecimento da importância dos fitonematoides, esses organismos são frequentemente denominados como patógenos, no entanto apenas 10% do nematoides causam malefícios às plantas, enquanto 25% são nematoides agrupados nos níveis tróficos de fungívoros, bacterívoros e onívoros, de acordo com o tipo de sua alimentação (Biederman *et al.*, 2008).

Nematoides apresentam diversas características positivas, tais como grande variedade e quantidade em uma área amostral reduzida, além de serem altamente sensíveis a alterações ambientais. Por isso, são considerados organismos bioindicadores essenciais para avaliar a qualidade e quantidade dos recursos que mantêm a cadeia alimentar do solo (Caixeta, 2015).

Ainda é desconhecido a correlação entre o nível populacional do nematoide com o nível de dano nas plantas. Sendo assim os defensivos químicos são normalmente utilizados por agricultores para o controle dos nematoides, ocasionando perda de matéria orgânica no solo e acaba proporcionando o desequilíbrio na comunidade e em um risco ambiental. Para a avaliação de risco, proveniente de substâncias químicas, impactos sobre diferentes tipos de manejo dos solos, bem como distúrbios que eles sofrem, vários testes de toxicidade com nematoides têm sido realizados e há crescente demanda em sua utilização em alguns países (Ritzinger *et al.*, 2010).

O estudo da comunidade que habita um ecossistema específico, considerando seus padrões alimentares e níveis de maturidade, revelou-se um excelente indicador dos danos provocados por poluentes ou alterações ecológicas, dados esses que evidenciam que organismos podem ser empregados de maneira eficaz em pesquisas sobre a sustentabilidade dos ecossistemas, em virtude de sua abundância, diversidade e reações a situações de toxicidade e perturbações ambientais (Ritzinger *et al.*, 2010).

Os agrossistemas costumam ser identificados por intervenções frequentes no solo, com a utilização de pesticidas e fertilizantes que comprometem a sucessão natural. Na qual cada uma dessas intervenções provoca um impacto particular no qual leva a redução da diversidade (Timper, 2014). Os nematoides conseguem reagir de forma rápidas as variações de alimentos em que é ofertado no qual possibilita através de análises de níveis trófico, avaliar e quantificar a diversidade desses organismos no ambiente (Diemont; Martin, 2005).

A partir da reação gerada pelos nematoides com relação ao que se alimentam, alguns estudos foram realizados neste contesto podendo avaliar suas interações com o solo e a planta resultando na sua indicação biológica. A exemplo disso os autores Pfotzer; Schuler (1997) e Forge *et al.* (2003) demostram que o uso de compostos orgânicos aumenta a atividade biológica do solo acarretando um crescimento no número de nematoides protozoários e bacteriófagos, fazendo que gere um aumento considerável na quantidade de matéria orgânica e na disponibilização de nutrientes para as plantas.

Gomes *et al.* (2003) relata que a presença da população de Dorylaimidae na comunidade é influenciada pelas práticas culturais, podendo assim servir como um sinal de perturbação ambiental, quando mais de 25% da população é composta por Dorylaimidae isso indicara que a uma intervenção mínima humana na área, e em contraste uma porcentagem menor sugere o oposto.

Para Leroy *et al.* (2007) os estudos indicaram que locais onde houve cultivo de milho com aplicação de fertilizante orgânico e esterco bovino por um período de sete anos apresentaram uma redução na quantidade de nematoides parasitas de plantas do gênero *Pratylenchus*, além de uma quantidade reduzida de espécies da família Tylenchidae. Por outro lado, nessa mesma região, observou-se um aumento na população de nematoides bacteriófagos da família *Rhabditidae*.

Um estudo que foi conduzido por Torres *et al*. (2006) no Brasil, especificamente em uma área de cultivo de melão em Braunas, no Rio Grande do Norte, mostrou uma escassa presença de nematoides da família Dorylaimidae típicos de regiões com culturas anuais. Isso reflete o elevado grau de desordem gerado pela longa prática de monocultura do algodoeiro que precedeu o cultivo do melão. Além disso foram observados altos níveis populacionais e bacteriófagos e fitoparasitas em comparação com outros grupos tróficos, enquanto a quantidade de predadores era bastante reduzida, evidenciando o tipo de uso agrícola da área, caracterizado pelo cultivo anual. No qual os mesmos autores apontam que o breve período ao qual a entressafra não foi o suficiente para restabelecer o equilíbrio da nematofauna que apresentava baixas populações tanto de onívoros como de predadores.

Nos Estados Unidos, foi realizada uma comparação entre a diversidade trófica e os índices de maturidade das comunidades de solo em cinco áreas de produção agrícola, sendo uma delas com sistemas “convencionais” que utilizam insumos químicos e outra com sistemas “orgânicos”, que não fazem uso desses insumos (Neher, 1999). As principais culturas analisadas nas áreas foram cereais e hortaliças.

Os índices ecológicos empregados na pesquisa não conseguiram de forma geral distinguir as comunidades de nematoides nos dois tipos de cultivos, com base nessa observação, chega-se à conclusão de que, ao contrário do que se poderia imaginar, os solos sob manejo orgânico não devem ser necessariamente considerados como ambientes de referência adequados, nem sempre sendo apropriados para estudos destinados a avaliar comparativamente a qualidade biológica dos solos em diferentes ecossistemas.

São múltiplas as características dos nematoides do solo que os qualificam como excelente bioindicadores de processos ecológicos, em que de acordo com Cairns *et al.* (1993). Os principais atributos que torna um organismo um bom bioindicador inclui a sua abundância em quase todos os habitats, assim como na diversidade nas estratégias de vida e hábitos alimentares (Yeates *et al.*, 1993), ciclos de vida curtos e métodos de amostragem que são relativamente claros.

Diversos fatores podem influenciar a estrutura da comunidade de nematoides, tais como, as interações na cadeia alimentar do solo, os impactos da correção da acidez do solo, a recuperação de áreas afetadas, variações na densidade de plantas por área, o nível de cobertura vegetal e as práticas de uso e manejo do solo. Os nematoides são capazes de reagir rapidamente a perturbações e ao enriquecer, a atividade microbiana aumentada, resultando em mudanças em relação ao número de alimentadores de bactérias em uma comunidade (Moura; Franzener, 2017).

A evolução da população de nematoides microbiófagos (fungívoros e bacteriófagos) geralmente coincidem com a dos microrganismos que se alimentam desses nematoides. Portanto nematoides e bacteriófagos afetam a atividade de fungos e bactérias, resultando em processos que os microrganismos realizam, os nematoides microbiófagos em várias condições ambientais contribui direta e indiretamente para a decomposição da matéria orgânica aumentando a taxa de mineralização de carbono e outras substancias nutritivas, além de estudos realizados que mostram que os nematoides podem contribuir com a mineralização de nitrogênio, respectivamente por volta de 8 a 19% em sistemas de manejo convencional (MC) e manejo integrado de pragas (MIP).

Embora os nematoides sejam abundantes na maioria dos ecossistemas, a sua contribuição para a respiração do solo é pequena, assim em termos de fluxo de energia eles parecem ter pouca importância. No entanto a relevância de um grupo de ide energia que processam. Nas cadeias alimentares, consumidores como os nematoides podem ser menos significativos para o fluxo de energia, mas desempenham um papel crucial na regulação de processos essenciais, como a decomposição da matéria orgânica (Goulart, 2007).

A dinâmica da população de nematoides microbiófogos tendem a se alinhar com as dos microrganismos que os alimentam. A atividade de fungos e bactérias é afetada pelos nematoides micófagos e bacteriófagos, o que acaba afetando a decomposição da matéria orgânica produzida por esses microrganismos. Os nematoides microbiófagos podem aumentar as taxas de mineralização de carbono e de outros nutrientes, desempenhando um papel direto e indireto no processo de decomposição da matéria orgânica em diferentes condições ambientais (Goulart, 2007).

2.2. HÁBITOS ALIMENTARES DE NEMATOIDES

Os nematoides cujo nome vem do (Grego, nema = fio, eidos = similar) são animais do reino Animalia, que são multicelulares triploblásticos e não segmentados, eles possuem cinco sistemas (nervoso, digestivo, muscular, reprodutivo e excretor). Os nematoides de vida livre se alimentam de microrganismos como, fungos, protozoários e bactérias. Porém existe os nematoides que se alimentam de pequenas minhocas ou oligoquetas, tardígrados, rotíferos ou de outros nematoides predadores. Existem também os que são parasitas de plantas superiores (Fitoparasitas), principalmente de seus órgãos subterrâneos, como por exemplo as raízes, existe os parasitas de órgãos aéreos, como por exemplo caule e frutos, possui também nematoides que são parasitas de animais, alimentam-se de vertebrados e invertebrados. (Ferraz; Monteiro, 1995).

Segundo Yeates *et al*. (1993) os principais grupos tróficos são: fitófagos, micófagos, bacteriófagos, predadores e onívoros. A morfologia da cavidade bucal dos nematoides se correlaciona com os seus hábitos alimentares. Alguns nematoides fitófagos, micófagos, predadores e onívoros apresentam bucal tipo estilete. Já os nematoides bacteriófagos, apresentam cavidade bucal cilíndrica e estreita. Existem também alguns nematoides que possuem características bucal de outros tipos como, globosa, ampla, armada com dentes, sendo estes predadores de pequenos animais que habitam no solo (Goulart, 2002).

Os nematoides fitófagos e micófagos, realizam sua alimentação penetrando os estiletes na célula de uma hifa e posteriormente injetam enzimas que realizam a digestão extra corporal no conteúdo celular. Já os bacteriófagos possuem uma alimentação mais simples, no qual ingerem células bacterianas vivas através de sua cavidade bucal que de

modo geral é cilíndrica e estrita, as bactérias que se alimentam são encontradas em matéria orgânica em decomp*osição. Quando a concavidade bucal é ampla e armada com dentes o que acontece no caso dos nematoide predadores esses são capazes de ingerir a presa por inteiro. A alimentação dos nematoides onívoros são pouco conhecidas ainda (Goulart, 2002).

Um ectoparasita é um organismo que se desenvolve na parte externa de um hospedeiro. No caso dos nematoides ectoparasitas, eles não penetram nas células vegetais com seu corpo; em vez disso, utilizam um estilete para perfurar as células e extrair o citoplasma, os nematoides ectoparasitas apresentam variações na maneira como se alimentam, dependendo da sua classe, ocupando diferentes regiões da raiz. Durante a alimentação, esses nematoides realizam várias estocadas com seu estilete contra a parede celular até conseguirem perfurá-la. Uma vez dentro da célula, o estilete libera secreções produzidas por glândulas esofágicas. Essas substâncias provocam a degeneração do núcleo e do citoplasma. Em seguida, os nematoides iniciam a sucção do líquido citoplasmático, absorvendo os nutrientes presentes. Após esgotar o conteúdo celular, eles movem seu estilete para frente em busca de uma nova célula para continuar se alimentando (Ledur, 2022).

Os fitonematoides responsáveis pelos danos e perder as culturas desenvolvidas e se dividir em migratórios e sedentários. *Pratylenchus* e *Radopholus* são os principais tipos de endoparasitas migratórios. Eles penetram nas raízes da planta até uma certa profundidade de células abaixo da planta, onde começam a alimentar-se introduzindo seu estilete, transbordando várias células próximas. Após que o exaurimento da célula e a sua morte, o nematoide continua a se mover por debaixo da epiderme, formando canais formadas por células que não estão mais funcionando (Ledur, 2022).

Em território americano, foram realizadas investigações sobre comunidades de nematoides em ecossistemas naturais e agroecossistemas, levando em conta diferentes graus de intervenção humana. Os pesquisadores notaram que os nematoides bacteriófagos eram predominantes em todas as áreas estudadas, enquanto os nematoides micófagos mostraram maior frequência na vegetação nativa. Por outro lado, os parasitas de plantas tiveram a menor prevalência em cultivos orgânicos. Os nematoides onívoros e predadores representaram apenas uma fração reduzida da comunidade em todas as regiões analisadas. Os autores destacaram que na vegetação nativa se constatou a maior riqueza de táxons e diversidade, ao passo que a área cultivada, isenta de produtos químicos industriais, apresentou um índice de diversidade de Shannon-Weaver relativamente baixo. Ademais, a presença de matéria orgânica foi capaz de induzir uma supressão aos nematoides parasitas de plantas (Caixeta, 2015).

2.3. DIVERSIDADE DE NEMATOIDES NO BRASIL

São muitos e diversos os organismos que fazem parte da biota do solo, possuindo muitos representantes dos filos terrestres e ainda existem muitos grupos taxonômicos para serem descobertos. A partir de alguns estudos tem se observado uma grande variação no tamanho do corpo de organismos na fauna do solo, e a partir do comprimento do corpo desses organismos é possível classificá-los como, microfauna, mesofauna, macrofauna e megafauna, sendo também possível classificar a fauna do solo a partir da largura do corpo do organismo, estando esta largura relacionada com o seu habitat, a microfauna habita alguns grupos incluído os nematoides (Goulart, 2002).

O ciclo de vida dos nematoides abrange o estágio do ovo, seguido por quatro fases juvenis e culminando na forma adulta. Ao longo do seu desenvolvimento, esses organismos passam por quatro ecdises. Ao eclodir os nematoides juvenis apresentam características semelhantes do futuro adulto. O ciclo pode ter duração entre dias a anos, podendo ser influenciada por fatores bióticos e abióticos, no entanto em média o ciclo dura entre uma e quatro semanas, no qual a quantidade de ovos formados pela fêmea ocorre entre 50 e 400 (Oliveira *et al.*, 2018).

A diversidade de nematoides em uma comunidade está diretamente relacionada ao aumento das oportunidades de interação entre as espécies que formam a cadeia alimentar, o que contribui para a sustentabilidade dos solos (Cares; Huang, 2008). Estudos sobre a diversidade de nematoides eram escassos até a década de setenta, a grande parte dos trabalhos desenvolvidos apresentavam apenas listas de ocorrência de espécies e observações gerais em plantas e solo. Na década seguinte teve um aumento sobre o estudo de nematoides no qual utilizavam índices matemáticos e análises estatísticas variadas.

No entanto o Brasil não acompanhou esses avanços relacionados ao estudo da diversidade de nematoides, sendo assim até o momento presente se tem poucos trabalhos voltados a este tema. Um estudo sobre a diversidade de nematoides deve ser classificado com o tipo de ecossistema amostrado, como por exemplo, apenas agroecossitemas, apenas ecossistemas naturais; e ecossistemas naturais e agroecossitemas (Goulart, 2002).

Muitos trabalhos que são desenvolvidos sobre a diversidade de nematoides no Brasil é ainda muito restrita a identificações taxonômicas, nestes acabam não considerando a quantidade de indivíduos de cada *táxon, se* tradando de diversidade biológica é de conhecimento que os dados são obtidos de forma quantitativa e qualitativas. Outro fato relevante é de que as pesquisas realizadas no Brasil são limitadas apenas a nematoides fitoparasitos, não havendo tantos estudos voltados a nematoides de vida livre (Goulart, 2002).

A totalidade da abundância é medida pela contagem dos nematoides em uma amostra de solo de volume conhecido. A abundância absoluta refere-se à contagem total de indivíduos de um táxon específico ou grupo trófico em uma amostra ou em um conjunto de amostras. Por outro lado, a abundância relativa diz respeito à porcentagem de indivíduos de um determinado táxon ou grupo trófico em relação ao total de indivíduos encontrados em uma amostra ou em várias amostras (Cares; Huang, 2008).

Em estudos inovadores sobre a diversidade de fitonematoides no Brasil, analisaram a fauna em áreas agrícolas e em regiões com vegetação nativa do bioma da Mata Atlântica, no município de Piracicaba (SP). Com os dados obtidos, os pesquisadores afirmaram que as áreas cultivadas apresentavam a ausência de algumas espécies da fauna nativa, além da introdução e disseminação de outras espécies, possivelmente através de material vegetal, ferramentas agrícolas contaminadas, água de irrigação ou águas pluviais drenadas. Eles também observaram que a fauna nematológica nas áreas com vegetação nativa possuía uma diversidade maior do que nas áreas cultivadas (Caixeta, 2015).

Com a interferência humana nos ecossistemas através da prática agrícola, diversas espécies de nematoides são introduzidas em novas regiões, podendo substituir as populações locais. Essas espécies não nativas podem se beneficiar das novas condições ambientais criadas pela agricultura contínua, e em alguns casos, se tornarem patógenos de plantas. Por outro lado, os nematoides associados à vegetação nativa também podem

se adaptar às condições dos solos cultivados, sendo encontrados em maior quantidade nesses solos do que nos solos com vegetação nativa correspondente (Caixeta, 2015).

A pesquisa sobre a variedade de nematoides, tanto em regiões agrícolas quanto em áreas com vegetação natural, tem despertado cada vez mais atenção devido ao crescente prejuízo econômico causado pelos parasitas de plantas na agricultura, bem como pelo potencial utilização da quantidade, diversidade e diferentes grupos alimentares da nematofauna como indicadores biológicos de perturbação ambiental (Cares; Huang, 2008; Goulart, 2009).

2.4. QUAIS CULTURAS SÃO MAIS ATINGIDAS PELOS NEMATOIDES?

O manejo cultural depende integralmente do tipo de cultivo utilizado em cada atividade agrícola. Considerando que o Brasil é um país que permite o cultivo de diversas espécies sob diferentes sistemas, este assunto se torna bastante extenso, algumas das principais culturas e sistemas que pode se destacar está a cana-de-açúcar que se caracteriza pela permanência da planta por cerca de cinco anos, após os quais ocorre a reforma do canavial, o cultivo de hortaliças, que são normalmente cultivadas em sequência nos mesmos canteiros ao longo de todo o ano, e o cultivo de plantas anuais, onde a soja é a cultura predominante na safra, frequentemente seguida pelo milho ou trigo, e em certas regiões, pelo algodão. Esses sistemas mencionados anteriormente possuem como características a alta suscetibilidade aos nematoides e os prejuízos anuais vindos por meio da ocorrência destes patógenos (Dias *et al.*, 2010)

Considerando as culturas mencionadas anteriormente, pode-se destacar como mais importantes, os nematoides das galhas, especialmente *Meloidogyne incognita* e *M. javanica*, os quais parasitam soja, milho, algodão (neste caso, *M. incognita*), hortaliças e cana-de-açúcar; o nematoide das lesões radiculares, com destaque para *Pratylencus brachyurus*, que parasita todas as espécies vegetais citadas anteriormente, e *P. zeae*, importante no milho (Arieira, 2017).

A cultura do milho (*Zea mays* L.), é pertencente do grupo de plantas com o metabolismo fotossintético do tipo C4, é uma das culturas que mais se destacam mundialmente, no panorama econômico e social, no Brasil não é diferente sendo um dos maiores produtores de milho do mundo. No atual momento o milho é cultivado em todas as microrregiões do Brasil, sendo o terceiro maior produtor mundial do cereal, os Estados Unidos estão na primeira colocação e a China em segundo (Kleinschmitt, 2018).

E no Brasil, as principais espécies de nematoides que causam sérios danos à cultura do milho incluem *Meloidogyne incognita*, *Pratylenchus brachyurus* e *P. zeae*. Apesar da falta de consciência sobre as perdas que esses fitonematoides podem trazer à lavoura de milho, o manejo adequado ainda não é uma prática comum no país. Contudo, existem estratégias para lidar com os fitonematoides na cultura do milho. A técnica mais amplamente utilizada é o tratamento de sementes com nematicidas, que podem ser sintéticos ou biológicos. Uma alternativa é o cultivo de variedades ou híbridos que sejam resistentes. Além dessas abordagens, a rotação e a sucessão de culturas podem ser utilizadas como práticas complementares (Oliveira *et al*., 2023).

Entre os nematoides, os que causam galhas, conhecidos como *Meloidogyne* spp., são considerados alguns dos mais significativos fitoparasitas. Eles apresentam alta patogenicidade em diversas espécies de valor econômico e estão amplamente espalhados em áreas agrícolas. A formação de galhas nas raízes impacta diretamente a capacidade da

planta em absorver nutrientes e água, o que pode resultar em redução da produção ou até mesmo na perda total, dependendo do estágio em que a planta é infectada (Ledur, 2022).

Os nematoides responsáveis pela formação de galhas nas raízes são endoparasitas sedentários. Após a oviposição das fêmeas, eclodem juvenis de segundo estágio (J2) com formato filiforme. Esses J2 penetram nas raízes das plantas de milho e estabelecem um local fixo de alimentação, constituído por células nutridoras, também conhecidas como células gigantes, resultando em um aumento de volume dos parasitas. Após passarem por três ecdises, eles se tornam adultos. Os machos possuem um corpo esbelto e são móveis, não infestando as plantas. Por outro lado, as fêmeas adquirem uma forma semelhante a uma pera e começam a gerar ovos, que são depositados em uma matriz gelatinosa, resultando na formação de uma massa de ovos. Em média, cada fêmea produz cerca de 500 ovos, embora existam registros de até 2.000 ovos nessa matriz, o que a torna uma espécie bastante prolífica. As espécies mais relevantes desse gênero são *M. javanica* e *M. incognita*, sendo esta última a que mais prejudica a cultura do milho e que apresenta uma ampla distribuição geográfica no Brasil (Oliveira *et al.*, 2023).

Conforme apontam Lopes; Ferraz (2016), os prejuízos gerados por nematoides são influenciados pela densidade populacional inicial do patógeno no solo, pela suscetibilidade da planta hospedeira e pelas condições ambientais. Em muitos casos, a presença de poucos ovos ou juvenis de segundo estádio do nematoide de galhas no solo, no momento do plantio, pode ser suficiente para ocasionar uma redução da produção a níveis inviáveis economicamente. Além disso, para tentar reduzir os danos e controlar a infestação do nematoide, os agricultores acabam enfrentando custos extras com a aplicação de fertilizantes, defensivos e outras práticas que visam lidar com os nematoides já presentes na área cultivada.

As espécies de nematoides *Pratylenchus brachyurus* e *P. zeae* são as que mais prejudicam a cultura do milho e muitas vezes aparecem juntas. Elas se adaptam bem ao clima tropical e são comuns nas condições do Brasil. Esses nematoides, conhecidos como endoparasitas migradores, apresentam todas as suas fases de desenvolvimento pós-emergente como infecções. A penetração nos tecidos da planta pode ocorrer entre células epidérmicas (penetração intercelular) ou dentro de uma célula (penetração intracelular). Após a invasão das raízes, os nematoides se alimentam das células, provocando lesões. Um fator que agrava a situação é que, através dessas feridas, fungos e bactérias patogênicas podem também invadir as plantas (Monteiro, 1963).

Os nematoides das lesões radiculares (*Pratylenchus* spp.) ocupam a segunda posição em termos de impactos em diversas culturas, possuindo uma grande variedade de hospedeiros. Os danos causados por esses organismos têm se intensificado à medida que as práticas agrícolas, como a safrinha e a safra irrigada, se tornam mais frequentes. Agindo como endoparasitas migradores, eles danificam os tecidos das raízes, tornando-as mais vulneráveis a infecções secundárias provocadas por fungos e bactérias (Ledur, 2022).

O Oeste do Paraná, também se destaca dentro do estado com a implementação de tecnologias para a produção de variedades precoce e superprecoce, além da adoção de plantio direto que melhora as condições de solo, podendo assim agilizar a transição de uma safra para outra. No Oeste do estado do Paraná é geralmente utilizado o ciclo superprecoce que possui ciclo de 120 dias e florescimento aos 60 dias (Ferreira, 2000). E sendo os nematoides uma das principais fitopatologias causadoras de danos a cultura e a produtividade, se faz necessário o estudo mais aprofundado sobre ele.

2.5. BIOINSUMOS NO CONTROLE DE NEMATOIDES

A preocupação com o estado ambiental tem reduzido o uso de nematicidas químicos e à procura de métodos de controle eficazes por meio da utilização de produtos baratos e não poluentes para o homem e para o meio ambiente e fácil de ser usado nas lavouras, a partir disso o uso de métodos biológicos para controlar nematoides aumentou nos principais grupos que cultivo (Fernandes, 2014).

No passado, as nematicidas eram ineficazes quando se trata do controle de nematoides, o método de aplicação por fumigação apresenta baixo rendimento por área, em conjunto com sua toxicidade elevada para o solo, para os produtores agrícolas e os consumidores finais. Os novos nematicidas usadas atualmente são mais eficazes no controle, apesar de existirem pouco estudo realizado sobre eles, as principais aplicações são através do tratamento de sementes que se mostra muito eficaz e com a aplicação no sulco de semeadura. Além do uso de nematicidas químicas, o uso de agentes de biocontrole com o objetivo de diminuir a população de nematoides e reduzir (Ledur, 2022).

Julius Gotthelf Kühn foi o precursor na criação de um método para controlar fitonematoides, um acontecimento que teve lugar em meados de 1881 na Europa, em um período em que agricultores enfrentavam grandes perdas na colheita de beterraba açucareira, afetada pelo parasita *Heterodera schachtii*. J. Kuhn se destacou por três inovações significativas para sua época: a introdução de um novo produto químico como nematicida, a utilização de plantas para auxiliar no controle da população de nematoides e a descrição de novas espécies de fitonematóides parasitas (Moura; Maranhão, 2004).

A criação de novos bionematicidas é uma das vias mais significativas de pesquisas futuras no controle de parasitas em plantas agrícolas. A busca por novas fontes de compostos bioativos e a utilização de métodos como edição genética têm o potencial de produzir nematicidas mais eficazes e específicos para nós de raiz. Além disso, é crucial considerar o desenvolvimento de formulações mais estáveis e simples de aplicar que reduziriam custos ao mesmo tempo em que aumentariam a acessibilidade de bionematicidas aos produtores (Chidichima, 2020).

Há várias estratégias sugeridas para o controle populacional de fitonematóides, incluindo a rotação e sucessão de culturas, a utilização de genótipos que apresentem resistência, a adição de fontes de matéria orgânica, o emprego de plantas que atuem como antagonistas, além do controle biológico e químico de forma integrada. De acordo com Inomoto *et al.* (2006), o comportamento polífago do *P. brachyurus* dificulta a implementação de genótipos resistentes e a rotação de culturas que sejam financeiramente viáveis.

O controle químico se destaca como uma das abordagens mais empregadas para diminuir a população de nematoides. Isso se deve ao seu efeito de contato, à capacidade de ação preventiva (efeito sistêmico), que proporciona à planta maior resistência contra os fitonematoides, além da facilidade na aplicação dos defensivos fitossanitários, que pode ser realizada por meio do tratamento de sementes ou diretamente no sulco de plantio (Pereira, 2020).

O inimigo natural dos nematoides no solo é o fungo, eles estão divididos em três categorias distintas: endoparasitos, predadores e ou parasitas de ovos. O fungo *Pochonia* pertence a esta última categoria. Chlamydosporia (Goddard) Zare & Gams, que também é

conhecido como *Verticillium chlamydosporium*, é um dos que podem ser mais usados em programas de biocontrole de nematoides (Fernandes, 2014).

A utilização limitada de nematicidas químicos tem estimulado a pesquisa e a elaboração de bionematicidas, que são compostos majoritariamente por fungos e bactérias. A adoção de bionematicidas representa uma estratégia de manejo mais econômica, tornando-se, assim, uma opção mais viável para os produtores. Entre os microrganismos que se destacam nos estudos voltados ao controle de *P. brachyurus*, encontram-se *Trichoderma asperellum*, *T. harzianum*, *Bacillus methylotrophicus*, *B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Purpureocillium lilacinus*, *T. harzianum, Pochonia chlamydosporia, Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*. No Brasil, até o presente momento, 14 nematicidas microbiológicos estão registrados no MAPA para o combate a *P. brachyurus* (Pereira, 2020).

No Reino Fungi, merece destaque a categoria dos fungos parasitas que atuam sobre ovos e fêmeas, os quais se comportam como saprófitos e possuem um notável desempenho na decomposição da matéria orgânica do solo. Esses fungos nutrem-se da quitina encontrada em uma das camadas da casca dos ovos e, de forma extraordinária, têm a capacidade de atacar e eliminar fêmeas adultas (Ferraz; Brown, 2016).

As rizobactérias exercem seu papel de maneira direta ao estimular o crescimento das plantas ou de forma indireta, funcionando como agentes de controle biológico (Ferraz; Brown, 2016). De acordo com Ferraz; Brown (2016) citados por Freitas (2001), essas bactérias são capazes de produzir antibióticos e toxinas que, ao serem absorvidas pelo ovo do nematoide, interrompem o desenvolvimento do embrião. Além disso, apresentam características nematostáticas, que dificultam a entrada do nematoide nas raízes. As rizobactérias também promovem a degradação dos exsudados radiculares, que têm a função de inibir a estimulação da eclosão e a movimentação direcionada dos nematoides em direção às raízes, uma vez que esses organismos se deslocam em resposta a estímulos quimiotróficos, buscando áreas com maior concentração de exsudados. No experimento realizado por Machado; Costa (2017) em uma casa de vegetação, observou-se que a inoculação de sementes de soja com *Bacillus subtilis* reduziu a presença de *P. brachyurus* e seus ovos no solo e nas raízes.

O grupo de nematicidas biológicos oferece um portfólio mais abrangente de produtos registrados como químicos para cereais no Brasil. O controle de biológico parece ser mais eficaz devido aos vários modos de ação desses agentes, os fungos e as bactérias são os principais agentes utilizados no controle, muitas delas de gênero conhecido e já em outros produtos bioquímicos. A eclosão, mobilidade e capacidade de são afetadas por alguns fungos, a penetração dos nematoides no hospedeiro por meio da produção de metabólitos tóxicos pode também alterar a fisiologia da planta, tornando-a menos atraente para o hospedeiro, por sua vez, alguns grupos de bactérias produzem enzimas altamente tóxicas que podem inibir a ovoposição e a eclosão de jovens, enquanto outros infectam o nematoide usando como incubadora para a produção de esporos, diminuindo a capacidade reprodutiva (Ledur, 2022).

A utilização de microrganismos benéficos é outra abordagem significativa para controlar nematoides na soja. A proliferação de microrganismos antagônicos na rizosfera pode reduzir o número de nematoides das galhas, enquanto a utilização de microrganismos simbióticos pode aumentar a resistência das plantas à infecção (Vaz, 2014). Outras perspectivas importantes incluem a modificação da rizosfera e a adição de matéria orgânica ao solo, essas modificações podem alterar as condições da rizosfera, o

que pode levar ao aumento da atividade de microrganismos e à diminuição do número de nematoides das galhas. Além disso, a prática de inocular plantas com microrganismos benéficos na rizosfera pode aumentar a resistência das plantas à infecção (Messa, 2020).

Segundo Abdel-Salam *et al.* (2018) os procedimentos com inoculação de *Bacillus amyloliquefaciens*, princípio ativo que está presente no produto usado neste estudo, tem se destacado no segmento devido ao seu potencial excepcional para combater nematoides. Seu comportamento se manifesta por colonização da rizosfera, o que promove o crescimento de novas populações bacterianas que auxiliam na eliminação do nematoide devido à forte associação favorável entre a produção de quitinases por cepas de *Bacillus amyloliquefaciens* e as consequências nematicida que combate o *Meloidogyne* desconhecido. O trabalho de Abdel-Salam *et al.* (2018).

O reconhecimento de novos agentes biológicos que podem ser usados para regular nematoides na soja é outra possibilidade empolgante para o controle de pragas nessas culturas. A busca por novas espécies de microrganismos e a utilização de métodos como bioprospecção podem levar à geração de novos agentes biológicos que são mais potentes e específicos para nematoides das galhas. Além disso, a utilização de métodos como microencapsulação de microrganismos pode aumentar a eficácia do controle e aumentar a duração da liberação de agentes no solo (Chaves, 2009).

O agronegócio contemporâneo é dinâmico, e a pressão da sociedade para substituir os nematicidas químicos altamente tóxicos por produtos mais sustentáveis para o meio ambiente tem motivado a busca de alternativas promissoras para o manejo de fitonematoides, que são menos prejudiciais ao homem e ao meio ambiente. Os bionematicidas, que são compostos principalmente por microrganismos, vêm sendo considerados uma das melhores maneiras de controlar fitonematoides dentro de uma abordagem de gestão do manejo integrado. Esses produtos são uma ferramenta vital para garantir o desenvolvimento sustentável da agricultura. Atualmente, nos casos em que o controle de fitonematoides é necessário, a tendência mundial é utilizar produtos à base de microrganismos e o termo "gerenciamento microbiológico do solo" é usado em vez de "manejo de nematoides. Para compreender e entender a função dos fitonematoides e como eles interagem com a microbiota do solo. Esses agentes de biocontrole podem controlar várias fases da vida dos fitonematoides. Isso inclui as fases dentro do ovo, as fases móveis no solo e as fases dentro das raízes. Os microrganismos preferidos para o biocontrole de fitonematoides são fungos e bactérias. Os bionematoides, que estão agora disponíveis no mercado brasileiro, têm um grande potencial para desenvolver estratégias promissoras para o controle integrado das populações de fitonematoides fitoparasitas em áreas agrícolas do país e do mundo, (Lima *et al.*, 2019).

O padrão global nos casos em que há a necessidade de lidar com nematoides e o uso de produtos compostos por microrganismos, como um dos componentes de gerenciamento integrado. O Brasil os produtos biológicos têm aumentado. A espécie determina muito o produto, de seu modo de seu nematoide alvo, facilidade de replicação em biofábricas, desenvolvimento e facilidade de emprego no campo. Quando se trata do modo de ação, esses recursos de biocontrole têm a capacidade sobre as fases vitais dos fitonematoides, semelhante às fases dentro do ovo, fases que se movem no solo.

Os fungos filamentosos são uma das principais fontes de enzimas para uso industrial. Entre as várias enzimas produzidas por esses fungos, podemos citar: dextranases, catalases, fitases, lacases, proteases, lipases, pectinases, quitinases e glicoamilases. Apesar da grande variedade de poucas dezenas dessas espécies de fungos

filamentosos encontrados na natureza são exploradas comercialmente como produtoras de enzimas para controlar os patógenos presentes no solo. Os nematófagos são classificados em quatro grupos. Categorias incluem fungos parasitas, fungos predadores ou formadores de armadilhas e fungos produtores de toxinas e fungos parasitas dos nematoides ovos e fêmeas. A aplicação de armadilhas é uma abordagem de ataque que envolve os fungos criam estruturas de anéis. (Corrêa *et al*., 2014).

A concentração de bactérias na rizosfera seja de dez a mil vezes maiores do que as outras que são compostas as populações bacterianas encontradas no solo na área mais distante. As bactérias rizobactérias *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. e *Pasteuria* spp. foram usados para o controle biológico de fitopatogênicos. Nos diversos locais ou habitats como, solo, nos tecidos das plantas hospedeiras e nos seus próprios nematoides (ovos e cistos) podem ser detectar bactérias capazes de produzir algo que prejudique a sobrevivência de fitonematoides, também a possíveis fatores que podem induzir resistência aumentando o desenvolvimento saudável da planta, que alguns autores chamam de principal estratégias para o parasitismo, a produção de toxinas, enzimas e antibióticos, interferindo no processo de reconhecimento de planta-hospedeiro. Os agentes biológicos de controle e seus metabólitos para encontrar soluções sustentáveis para o meio ambiente se concentrou principalmente em questões relacionadas. Entre os participantes do controle biológico em um estágio ou no mercado as bactérias rizosféricas, resultado de avanços na pesquisa e no desenvolvimento, assumiram um papel importante como resultado dos resultados de sua eficiência, neste sentido, os metabólitos que são produzidos como produtos secundários e as rizobactérias podem ser fontes de novos nematicidas. Mesmo assim, há de considerar os custos associados à produção de nematicidas, que podem chegar a centenas de milhões de dólares e o nível de controle eficiente em ambiente de campo de acordo com a estabilidade dos metabólitos, espectro patógeno-alvo, interações com plantas e outros organismos e de seu impacto no meio ambiente (Lima *et al.,* 2019).

Os nematoides são uma das principais ameaças para a agricultura, resultando em prejuízos significativos. Eles afetam uma variedade de culturas em todo o mundo. Para combater essa praga, são utilizados métodos tradicionais que incluem controle cultural, químico, genético, físico e biológico (Chidichima, 2020). É necessário realizar uma análise detalhada da ecofisiologia da espécie-alvo para implementar com sucesso o controle biológico. Além de estudar a interação do agente de controle biológico com o organismo alvo, é essencial investigar sua relação com o ambiente e outras espécies.

De maneira geral, os microrganismos utilizados como agentes de controle biológico apresentam diversas ações conforme mencionado anteriormente. É fundamental que esses microrganismos demonstrem certa resistência aos produtos químicos comerciais mais utilizados, garantindo sua compatibilidade com pesticidas e herbicidas frequentemente empregados (David, 2023). As mudanças fisiológicas provocadas pelos bionematicidas nas plantas também podem auxiliar no combate aos nematoides. Pesquisas indicam que alguns compostos têm a capacidade de estimular a produção de substâncias secundárias nas plantas, aumentando sua capacidade de resistência aos nematoides (Messa, 2020).

Também é importante no controle de nematoides manter a saúde do solo, matéria orgânica, biodiversidade e melhorar a estrutura do solo (Chidichima, 2020). O controle biológico demonstrou ser um método bem-sucedido de manter a população de fitonematoides abaixo do nível de dano econômico, isso foi realizado por meio do uso de agentes de biocontrole. Aquino (2021) afirma que existem mais de 200 organismos considerados predadores naturais de nematoides, incluindo bactérias e fungos. Entre os

agentes de biocontrole, *Bacillus* spp. é um dos gêneros mais proeminentes por seus vários métodos de combate à filariose. Essas ações incluem a produção de substâncias que inibem a eclosão e o movimento dos nematoides, além da capacidade de colonizar raízes de plantas, o que cria uma barreira física e química que impede a entrada do patógeno (Teixeira, 2021).

O uso de bionematicidas também tem sido considerado uma alternativa promissora para o controle de nematoides na produção agrícola. Esses produtos são feitos de componentes ativos com ação nematicida e fabricados por microrganismos, como fungos e bactérias (Silva, 2015). Os bionematicidas podem ser usados diretamente no solo para tratar ou como bioestimulantes para as plantas, e eles são mais tóxicos e seletivos em comparação com produtos químicos tradicionais (Miamoto, 2018). Apesar dos avanços nos estudos sobre o manejo de nematoides na agricultura brasileira ainda enfrenta muitos obstáculos. A escolha de Populações resistentes e produtos ineficazes são alguns dos desafios que os agricultores enfrentam (Souza Junior, 2011).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, portanto, que a partir de pesquisas realizadas é crescente o uso do controle biológico de fitonematoides, especialmente através do uso de bionematicidas, que são compostos por microrganismos como fungos e bactérias. No qual esses métodos são mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente em comparação com os nematicidas químicos tradicionais, que têm impactos negativos no solo e na saúde humana. Além disso, o manejo integrado que inclui práticas como rotação de culturas, uso de variedades resistentes e a adição de matéria orgânica, é fundamental para a eficácia no controle de nematoides. O reconhecimento da importância dos microrganismos na rizosfera e a busca por novos agentes biológicos para o controle de pragas representam direções promissoras para a agricultura sustentável. A manutenção da saúde do solo e a biodiversidade são essenciais para garantir a produtividade agrícola e a sustentabilidade a longo prazo.

REFERÊNCIAS

[1] ABDEL-SALAM, M. S. et al. Melhorando o potencial nematicida de *Bacillus amyloliquefaciens* e *Lysinibacillus sphaericus* contra o nematoide das galhas *Meloidogyne incognita* usando a técnica de fusão de protoplastos. **Jornal Egípcio de Controle Biológico de Pragas**, v. 28, n. 1, p. 1-6, 2018.

[2] AQUINO, N. C. R. M. Plantas de cobertura e agentes de biocontrole no manejo de nematoides na cultura do milho. 2021, 28 f. Dissertação (Mestrado em proteçãode plantas) - Instituto Federal Goiano, Campus Urutaí, Urutaí, 2021.

[3] BIEDERMAN, L. A.; BOUTTON, T. W.; WHISENANT, S. G. Nematode community development early in ecological restoration: the role of organic amendments. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 40, p. 2366–2374, 2008.

[4] CAIXETA, L. B. **Diversidade de nematoides em sistemas de uso do solo nos biomas de Mata Atlântica e Caatinga e aspectos taxonômicos e filogenéticos da família Telotylenchidae**. 2015. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Fitopatologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: file:///C:/Users/User/Documents/Diversidade_de_nematoides_em_sistemas_de.pdf. Acesso em: 20 jul. 2024.

[5] CLAUDIO, M.; DE OLIVEIRA, M.; INOMOTO. Divulgação científica nematoides que atacam a cultura do milho no Brasil. v. 85, p. 1–13, 2023.

[6] CHIDICHIMA, L. P. S. **Reação de plantas de cobertura a diferentes populações de Meloidogyne javanica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de plantas) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020. Disponível em:<http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6580>. Acesso em: 18/07/2024.

[7] **Congresso Brasileiro De Nematologia**, 34., 2017, Vitória. **Anais** [...] Manejo cultural de nematoides: sistemas de cultivo. Vitória: Cbn, 2017. Disponível em: https://nematologia.com.br/files/anais/2017/Manejo%20Cultural%20sistemas%20de%20cultivo.pdf. Acesso em: 28 ago. 2024.

[8] **Congresso Brasileiro De Nematologia**, 2009, Alagoas. Utilização de Produtos Alternativos no Manejo de Nematoides da Cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco. Alagoas: Cbn, 2009. Disponível em: https://nematologia.com.br/files/revnb/33_3.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

[9] CORRÊA, R. C. G. et al. Efeito da concentração de clamidósporos de Pochonia chlamydosporia var. chlamydosporia no controle de Meloidogyne javanica. **Nematologia Brasileira**, v. 32, p. 327–332, 2014.

[10] DAVID, G. Q. **Mecanismos de biocontrole e promoção de crescimento de cepas de Trichoderma na cultura da soja**. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -UNESP, Ilha Solteira, 2023. Disponível em:<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/243824>. Acesso em: 09 mai. 2024.

[11] DIAS, W. P. et al. Nematoides em Soja: identificação e controle. Londrina: **Embrapa Soja**, 2010. 8p.

[12] DIEMONT, S. A. W.; MARTIN, J. F. Impactos do manejo na diversidade trófica de comunidades de nematoides em um sistema agroflorestal indígena de Chiapas, México. **Pedobiologia**, v.49, p.325-334, 2005.

[13] FERNANDES, R. H. **Bionematicida à base de *Pochonia chlamydosporia* no controle de *Meloidogyne incognita* em cenoura**. 2014. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa Campus de Rio Paranaíba, Rio Paranaíba, 2014. Disponível em: https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/d4af55f4-af4a-4b0f-b840-55a100ecafa2/content. Acesso em: 28 ago. 2024.

[14] FERRAZ, L. C. C. B. & MONTEIRO, A. R. Nematoides. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Ed). **Manual de Fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Ceres, 1995. v.1, cap.8, p.168-201.

[15] FERRAZ, L. C. C. B.; BROWN, D. J. F. Nematologia de plantas: fundamentos e importância. **Sociedade Brasileira de Nematologia**, 2016. 251 p.

[16] FERREIRA, L. F. **A Cultura do Milho.** Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/doc/site/serevicoseprodutos/livraria/Culturas/Cultura%20do%20Milho.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

[17] KLEINSCHMITT, E. **Desenvolvimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays*) em resposta à inoculação de *Azospirillum brasilense* e ao uso de fertilizantes bioindutores.** 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/165170. Acesso em: 25 set. 2021.

[18] LOPES, E. A.; FERRAZ, S. Importância dos fitonematoides na agricultura. In: C. M. G. Oliveira, M. A. Santos, L. H. S. Castro. (Org.). **Diagnose de fitonematoides**. Campinas, SP, Millennium Editora, 2016. v.1, p. 14.

[19] MESSA, V. R. Controle biológico de fitonematóides mediante aplicação de fungos nematófago e micorrízicos na cultura da soja. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitossanidade e Controle Alternativo) – Universidade Estadual Do Oeste do Paraná, Paraná, 2020. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/4871>. Acesso em: 01 mai. 2024.

[20] MIAMOTO, A. **Reação de *Macrotyloma axillare* cv. Java a fitonematoides e histopatologia da interação com *Meloidogyne javanica***. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de plantas) - Universidade Estadual de Maringá,Maringá, 2018. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6597>.Acesso em: 14 ago. 2024

[21] MONTEIRO, A. R. Pratilencose do milho. **Revista de Agricultura**, v. 38, p. 177-187, 1963.

[22] MOREIRA., F. M. S. **Biodiversidade do solo em sistemas de uso da terra na Amazônia ocidenta**. In: PERES, Carlos A. Conservação da Biodiversidade em paisagens antropizadas do Brasil. Curitiba: Editora Ufpr, 2013. Cap. 14. p. 293-326. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/975183/1/cap.14ConservacaodaBiodiversidadepaisagensantropizadasdoBrasil.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

[23] GOULART, A. M. C. **Diversidade de Nematóides em Agroecossistemas e Ecossistemas Naturais.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/571966/1/doc191.pdf. Acesso em: 14 jul. 2024.

[24] GOULART, A. M. C. 2009. **Análise de dados em estudos de diversidade de nematoides.** Embrapa Cerrados, Brasília-DF, 43pp.

[25] GULART, A. M. C. **Diversidade de nematóides em áreas de vegetação nativa e cultivada em São Carlos, Estado de São Paulo, Brasil**. 2003. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Usp, Piracicaba, 2002. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11135/tde-20200111-121919/publico/GoulartAlexandreMouraCintra.pdf. Acesso em: 16 jul. 2024.

[26] INOMOTO, M. M. et al. Reação de seis adubos verdes a Meloidogyne javanica e Pratylenchus brachyurus. **Nematologia Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 1, p. 35-38, 2006.

[27] LEDUR, J. A. **Uso de diferentes espécies de plantas de cobertura e de bionematicida na população de fitonematóides presentes no solo**. 2022. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul (Uffs), Cerro Largo, 2022. Disponível em: https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/5793/1/LEDUR.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

[28] LIMA, I. M. Bionematicidas contemporâneos: aplicabilidade e importância no manejo de fitonematoides em áreas agrícolas. **Sustentabilidade na Agropecuária**, Vitória, v. 10, n. 2, p. 90-100, 2019.

[29] LEROY, B. L. M. M. et al. A aplicação de composto de resíduos de vegetais, frutas e jardins (VFG) além de dejetos bovinos em uma monocultura de milho para silagem: efeitos na fauna e na produtividade do solo. **Jornal Europeu de Biologia do Solo**, v. 43, p. 91-100, 2007.

[30] MOURA, R. M.; MARANHÃO, S. R.; VAZ, L. Dados históricos e projeções futuras sobre a fitonematologia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 1, p. 47-68, 2004.

[31] MOURA, G. S.; FRANZENER, G. Biodiversidade de nematoides indicadores biológicos da qualidade do solo em agroecossistemas. **Arquivos Do Instituto Biológico**, n. 84, 2017.

[32] OLIVEIRA, C. M. G. et al. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. **Comps. Hortaliças-fruto [online].** Maringá: EDUEM, pp. 315-338, 2018.

[33] PEREIRA, B. V. B. **Eficiência de nematicidas químicos, bionematicidas e extratos vegetais no controle de *Pratylenchus brachyurus* em soja.** 2020. 39 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, Urutaí, 2020. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/1228/3/Dissertacao_Barbara%20Vieira%20de%20Brito%20Pereira.pdf. Acesso em: 28 ago. 2024.

[34] PFOTZER, G. H.; SCHULER, C. Efeitos de diferentes corretivos de composto na atividade alimentar biótica e faunística do solo em um sistema de agricultura orgânica. **Agricultura Biológica e Horticultura**, v.15, p.177-183, 1997.

[35] RITZINGER, C. H. S. P.; FANCELLI, M.; Ritzinger, R. Nematoides: bioindicadores de sustentabilidade e mudanças edafoclimáticas. **Revista Brasileira De Fruticultura**, v. 32, n.4, p. 1289–1296, 2010.

[36] SILVA, C. A. T. **Potencial do crambe para o manejo de nematoide das lesões radiculares e das galhas na cultura da soja**. 2015. Dissertação (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas - Universidade Estadual de Maringá - Maringá, 2015.Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/1158>. Acesso em:10 ago. 2024.

[37] SOUZA JÚNIOR, J. D. A. **Análise funcional de genes de *Meloidogyne incógnita* envolvidos na interação planta-nematoide.** 2011. Tese (Doutorado em Biologia Molecular/Departamento Biologia Celular) - Universidade de Brasília - Brasília, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/10451>. Acesso em: 25 ago. 2024.

[38] TEIXEIRA, S. J. C. **Interação entre plantas de cobertura e agentes de biocontrole no manejo de nematoides na cultura da soja**. 2021. 27 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) - Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, Urutaí, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/2156>. Acesso em: 24 ago. 2024.

[39] TIMPER, P. Conservando e Melhorando o Controle Biológico de Nematóides. **Revista de Nematologia**, v.46, n.2, p.75-89, 2014.

[40] TORRES, G. R. C. et al. Aspectos ecológicos da comunidade de nematoides associada ao cultivo de Cucumismelo no Rio Grande do Norte. **Nematologia Brasileira**, v.30, n.1, p.1-9, 2006.

[41] NEHER, D. A. Comunidades de nematoides em solos agrícolas manejados orgânica e convencionalmente. **Jornal de Nematologia**, v.31, p.42-154, 1999.

[42] VAZ, L. A. **Estirpes de *Bacillus thuringiensis* como promotoras de crescimento vegetal e no controle de pragas em diferentes culturas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/16434>. Acesso em:15 abr. 2024.

[43] YEATES, G. W. et al. Feeding habits in soil nematode families and genera — an outline for soil ecologists. **Journal of Nematology**, v. 25, n. 3, p. 315-3, 1993.

Capítulo 12

Estratégias de fitorremediação e biorremediação: implicações na saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental

Marcela Jacomini Corsini[1]
Alexandre Magno de Souza Maximiano[2]
Affonso Celso Gonçalves Junior[3]
Fabiana Gisele da Silva Pinto[4]

Resumo: O rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, acarretou alterações ambientais em escala regional, levando à necessidade do desenvolvimento de Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH), para avaliação dos potenciais riscos ao ser humano, associada ao contato com o rejeito ou com sua mistura (rejeito-solo-sedimento-detritos) e, caso necessário, definição de estratégias de reabilitação, remediação e monitoramento ambiental. O presente capítulo tem como objetivo apresentar o detalhamento técnico e a base metodológica a ser aplicada em estudos de alternativas para remediação biológica no contexto de estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH) em escala regional, tendo como estudo de caso a região da bacia do Rio Paraopeba impactada pelo rompimento das barragens em Brumadinho (MG). O levantamento bibliográfico apontou um grande potencial na utilização de técnicas de remediação combinadas, sendo que no presente estudo, propõe-se as técnicas de fitorremediação e biorremediação.

Palavras-chave: Barragem. Biorremediação. Fitorremediação. Brumadinho.

[1] Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais (PPRN)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR
[2] Pós-Doutorando no Programa de Engenharia de Energia na Agricultura/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR
[3] Docente e Orientador de Mestrado e Doutorado nos seguintes programas: Conservação e Manejo de Recursos Naturais & Engenharia de Energia na Agricultura/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-1699-1545
[4] Laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI)/ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)/ Cascavel – PR https://orcid.org/0000-0002-0486-8486

1. INTRODUÇÃO

Os compostos bioativos originam-se do metabolismo secundário das plantas e estão distribuídos por todo o organismo vegetal. Uma das notáveis características desses compostos reside em sua capacidade antioxidante, sendo os flavonoides, carotenoides e compostos fenólicos os mais proeminentes nesse contexto (Silva *et al*., 2010).

Os compostos antioxidantes conferem benefícios à saúde humana ao contribuir para o equilíbrio fisiológico e a modulação das vias biológicas (Smeriglio *et al*., 2019). Os antioxidantes endógenos desempenham papéis cruciais na produção, equilíbrio e manutenção dessas substâncias, uma vez que são proteínas responsáveis por proteger os tecidos contra os danos causados pelo estresse oxidativo (Singh *et al*., 2019; Jawed *et al*., 2019). A oxidação lipídica representa um dos desafios preeminentes enfrentados pela indústria devido à sua capacidade de induzir sabores e odores indesejados nos produtos (Santos *et al*., 2020). Portanto, a busca por alternativas torna-se de extrema importância, visando substituir o uso de antioxidantes sintéticos na indústria, e explorando produtos naturais como fontes de antioxidantes para promover a saúde tanto humana quanto animal.

Um dos grandes desafios da sociedade atual em questões ambientais é o gerenciamento de impactos associados a grandes eventos que promovam alterações em escala regional na saúde e qualidade de vidas das populações, bem como no equilíbrio natural do meio ambiente.

Em estudo desenvolvido por Zabeo *et al.* (2011), o autor indica que para identificação da vulnerabilidade de receptores humanos e ecológicos em escala regional, deve ser considerada a inclusão de diferentes receptores potencialmente impactados submetidos a diferentes cenários de exposição, inclusão de uma análise espacial para o gerenciamento do risco, e a aplicação de metodologias que incluam técnicas de análise de decisões baseadas em multicritérios que tratem de parâmetros regionais para fundamentar as medidas de intervenção a serem aplicadas para mitigação do risco quantificado.

O rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, ocorreu em 25 de janeiro de 2019 e causou a liberação de um grande volume de rejeito de minério de ferro para o sistema fluvial e seu entorno imediato localizado a jusante da barragem e ao longo de cursos d'água da bacia do Rio Paraopeba (Lima, 2020).

Este rompimento acarretou alterações ambientais em escala regional, levando à necessidade do desenvolvimento de Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH), para avaliação dos potenciais riscos ao ser humano, associada ao contato com o rejeito ou com sua mistura (rejeito-solo-sedimento-detritos) e, caso necessário, definição de estratégias de reabilitação, remediação e monitoramento ambiental.

Nesse contexto, para o desenvolvimento adequado de estudos de ARSH em escala regional, é fundamental o estabelecimento de aspectos regionais para definição do background natural e valores representativos da área e livres de influência da fonte (VRA), bem como investigar aspectos exposicionais específicos associados às populações potencialmente expostas. Sendo assim, serão desenvolvidas as etapas de consolidação e validação de dados secundários, aquisição e validação de dados primários que sirvam de base para avaliação da exposição e quantificação do risco, considerando características específicas de cada população potencialmente exposta, análise de toxicidade detalhada e

a quantificação do risco. O risco quantificado será utilizado como base de gerenciamento para definição de alternativas de remediação ambiental vigando sua mitigação a níveis aceitáveis para exposição humana.

Para definição de alternativas de remediação adequadas e alinhadas com o contexto de impactos e alterações ambientais a nível regional, destaca-se diversos desafios a serem considerados, sendo os principais:

- Caráter regional ocasionando impactos e alterações ambientais em aproximadamente 320 km da BHRP;
- Fonte primária de contaminação única, corresponde ao rejeito das barragens B-I, B-IV e B-IVA, a qual encontra-se a grandes distâncias de locais a jusante do rompimento, onde ocorre impactos ambientais e exposição humana;
- Fontes secundárias de contaminação associadas ao processo de deposição do rejeito e da mistura ao longo do trecho impactado da BHRP em diferentes locais e relacionadas a diferentes compartimentos do meio físico;
- Fontes difusas de contaminação (antrópicas) não relacionadas à fonte primária de contaminação de interesse para o estudo de ARSH;
- Condições de contorno regionais de difícil definição e caracterização;
- Múltiplos Cenários de exposição específicos de cada população receptora encontras ao longo do trecho impactado da BHRP;
- Múltiplas partes interessadas nos estudos de ARSH.

O arcabouço metodológico das etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) utilizado para fundamentar esse capítulo, teve como base o previsto na Resolução CONAMA nº 420 (CONAMA, 2009), na Decisão de Diretoria 038/C CETESB (CETESB, 2017) e na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH no. 02/2010 (COPAM/CERH, 2010), as quais serão utilizadas para fundamentação do GAC aplicado ao contexto da Bacia do Rio Paraopeba (BHRP) no âmbito do rompimento das barragens da Mina Córrego do Feijão.

2. OBJETIVOS E METAS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar o detalhamento técnico e a base metodológica a ser aplicada em estudos de alternativas para remediação biológica no contexto de estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH) em escala regional, tendo como estudo de caso a região da bacia do Rio Paraopeba impactada pelo rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, ocorrido em 25 de janeiro de 2019 em Brumadinho (MG).

3. ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE BRUMADINHO (MG)

Em 25 de janeiro de 2019, o rompimento das barragens da Mina Córrego do Feijão, de propriedade da Vale S.A., em Brumadinho, Minas Gerais, resultou em uma tragédia que tirou a vida de 272 pessoas e causou a disseminação de resíduos de minério na bacia do Rio Paraopeba, desencadeando consequências sociais, culturais, ambientais e econômicas avassaladoras.

Como resposta ao desastre, o governo de Minas Gerais, juntamente com o Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Ministério Público Federal e a Defensoria Pública do Estado de Minas Gerais, firmaram, em fevereiro de 2021, um Acordo Judicial de Reparação com a Vale S.A., com mediação do Tribunal de Justiça de Minas Gerais. Esse acordo estabeleceu a responsabilidade da Vale S.A. pelos danos e a realização dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Risco Ecológico (ERSHRE) em 29 municípios para avaliar os impactos na saúde das pessoas e no meio ambiente causados pela exposição a contaminantes químicos.

Fluxos de massa associados a rompimentos de barragens de rejeitos de minério são movimentos gravitacionais complexos, que no caso do rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão[5] devastaram um trecho superior a 9 km na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ferro-Carvão (BHRFC) e percorreram por vias fluviais mais de 300 km entre o ponto de colapso dos barramentos e a Usina Hidrelétrica (UHE) Retiro Baixo.

Conforme citado por LIMA (2020), o comportamento e alcance desses fluxos dependem de uma série de fatores que envolvem:

- Aspectos construtivos da barragem (RICO M, *et al.* 2008);
- O tipo de rejeitos armazenados (ROCHE C, *et al*. 2017);
- As características morfométricas do ambiente natural (CHEN H, *et al.* 2006);
- Sua interação com o solo e corpos d'água superficiais, como rios, lagos e mares (MAMBRETTI S *et al.* 2008; CHEN *et al.*, 2006).

Adicionalmente, aspectos associados à ruptura como velocidade de rompimento, tipo de rompimento, velocidade de erosão, aspectos construtivos e geotécnicos como falhas estruturais ou liquefação, também influenciaram no comportamento e no alcance desses fluxos (Lima, 2020).

O entendimento do processo de deposição do material nas barragens B-I, B-IV e B-IVA e do processo de ruptura ocorrido, a caracterização das propriedades do rejeito liberado e o mapeamento das áreas de formação de depósitos e de sedimentação do material associado ao fluxo de rejeito e outros materiais pós-rompimento, são importantes para o entendimento dos impactos e alterações regionais, definição da base de dados para o desenvolvimento de estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH).

No rompimento em questão, houve a deflagração de um fluxo de massa de alta energia e turbulento, movendo-se ao longo de caminhos bem definidos pelo vale da BHRFC. A passagem do fluxo de detritos e rejeitos liberados pelo rompimento das barragens gerou um processo erosivo ao longo da calha e da planície aluvionar do ribeirão Ferro-Carvão, promovendo um progressivo aumento de volume e mistura de materiais de origem natural (solo e sedimento) e antropogênica (estruturas operacionais, equipamentos, caminhões, locomotivas, entre outros), definido nesse capítulo como mistura (rejeito-solo-sedimento-detritos).

Com o decréscimo da energia gravitacional, o depósito de grandes volumes do material supramencionado ocorreu em áreas menos íngremes e porções mais baixas do

[5] As barragens do Córrego do Feijão eram marginalmente estáveis, compostas por um rejeito principalmente solto, saturado, pesado e quebradiço que apresentou altas tensões no talude a jusante (Silva; Gomes (2013); Robertson *et al.* (2019)).

talvegue e planícies aluvionares da BHRFC, até sua confluência com a bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP). O material que seguiu para jusante da confluência da BHRFC foi depositado heterogeneamente na calha do Rio Paraopeba e em suas planícies aluvionares, à medida que a energia de transporte sedimentar diminuía. Com o aporte do material do rompimento no Rio Paraopeba, formou-se uma pluma de turbidez, com alto conteúdo de sólidos em suspensão, composta dos detritos e materiais misturados na região de ocorrência do rompimento (mistura rejeito-solo-sedimento-detritos). Seu avanço e efeitos foram acompanhados nos primeiros meses por diversas entidades (ANA, CPRM, IGAM, VALE) sendo relatadas alterações até o barramento da UHE Retiro Baixo (CPRM, 2019).

De acordo com CPRM (2019), foi estimado que cerca de 9Mt de rejeitos foram remobilizadas, das 11,7Mt existentes nas barragens antes do rompimento. Do montante de 9Mt, 4Mt ficaram retidos na BHRFC, enquanto 5Mt seguiram para a BHRP. É importante ressaltar que esses cálculos de volume não consideraram o solo oriundo do manto de intemperismo que foi remobilizado do vale do ribeirão Ferro-Carvão.

Já de acordo com (TEC3, 2020), o volume remobilizado a partir do rompimento das barragens da Mina Córrego do Feijão foi de cerca de 9,7 Mm3, sendo que aproximadamente 8,1 Mm3 foram depositados no vale do ribeirão Ferro-Carvão, e 1,6 Mm3 passaram da confluência do Córrego Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, impactando diretamente o sedimento deste corpo hídrico.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS PARA IMPACTOS REGIONAIS

Para o desenvolvimento do presente estudo, os seguintes protocolos e procedimentos técnicos serão utilizados como referencial teórico:

- USEPA - *Environmental Protection Agency.* 1989*. Risk Assessment Guidelines for Superfund* (RAGS), *Human Health Evaluation Manual* (EPA/540/1-89/002). PART A, Volume I. Última atualização em dezembro de 1989 (https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part).
- USEPA - *Environmental Protection Agency*. 2011. *Exposure Factors Handbook*, Volumes I, II e III. *National Center for Environmental Assessment* (EPA/600/R-09/052F). Última atualização em setembro de 2011 (https://www.epa.gov/expobox/about-exposure-factors-handbook).
- RESOLUÇÃO CONAMA nº 420/2009. 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, DF.
- COPAM/CERH. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02/2010. 2010. Estabelece diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Belo Horizonte, MG.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). 2017. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. São Paulo, SP.

- USEPA - *Environmental Protection Agency.* 2007. *Framework for Metals Risk Assessment*. Washington, DC, EPA 120/R-07/001.
- USEPA - *Environmental Protection Agency.* 2014. *Framework for Human Health Risk Assessment to Inform Decision Making*. Washington, DC, EPA 120/R-07/001.

O estudo pretende utilizar os princípios apresentados pelo Framework for Metals Risk Assessment (USEPA, 2007). Será importante apresentar os princípios que diferenciam os compostos metálicos inorgânicos de outros produtos químicos. Esses princípios básicos merecem consideração cuidadosa ao avaliar os riscos para a saúde humana e o meio ambiente associados à exposição aos metais ou compostos metálicos e serão abordados e incorporados ao projeto de pesquisa.

Conforme discutido pela USEPA no Framework for Metals Risk Assessment (USEPA, 2007), em estudos de ARSH é importante avaliar os princípios que diferenciam os compostos metálicos inorgânicos de outros produtos químicos. Esses princípios básicos merecem consideração cuidadosa ao avaliar os riscos a saúde humana associados à exposição de receptores a metais ou compostos metálicos. Os principais princípios básicos a serem adotados no presente projeto de doutorado são os listados a seguir.

- Os metais são constituintes naturais do meio físico e variam em concentração e distribuição no ambiente em superfície e subsuperfície, sendo que:
- Seres humanos nascem e chegam a vida adulta na presença de metais e são adaptados a vários níveis de concentração desses elementos. Muitos seres humanos possuem distribuições geográficas que refletem requisitos variáveis e tolerância a certos metais. Essas diferenças regionais em requisitos e tolerâncias devem ser consideradas quando da realização de testes de toxicidade, na avaliação dos riscos e extrapolações entre regiões que diferem naturalmente nos níveis dos metais de interesse para o estudo;
- Como resultado de processos antropogênicos, níveis de metais no momento da avaliação ambiental podem ser incrementados em relação aos níveis que ocorrem naturalmente. Dependendo do objetivo da ARSH, deve-se entender e distinguir os valores representativos da área e livres de influência da fonte (VRA) e as contribuições adicionais associadas a fonte potenciais de contaminação (FPC) em estudo.
- Alguns metais são essenciais para manter a saúde adequada de seres humanos, animais, plantas e microrganismos.
- Os metais, diferentemente dos produtos químicos orgânicos, não são criados nem destruídos por processos biológicos ou químicos; embora, esses processos possam transformar metais de uma espécie para outra (estados de valência) e convertê-los entre formas inorgânicas e orgânicas.
- A absorção, distribuição, transformação e excreção de um metal dentro de um organismo depende do metal, da forma de ocorrência do metal ou do composto metálico, e da capacidade do organismo de regular e armazenar o metal.
- Seres humanos se alimentam de diversas formas e de alimentos de diversas origens. Sendo assim, pode haver grande variabilidade na ingestão de alguns metais, resultando em variabilidade temporal (por exemplo, picos de metais no organismo após uma determinada refeição ou associada ao estágio de vida) e

geográfica (por exemplo, regiões ricas naturalmente em um determinado metal podem gerar alimentos vegetais com concentrações maximizadas daquele metal).

- Em todos os compartimentos ambientais, ocorrem misturas ou associações naturais de metais, sendo que: alguns metais agem de maneira aditiva quando estão associados a outros metais; outros agem independentemente de outro metal; e outros ainda são antagônicos ou sinérgicos. Tais interações são aspectos importantes na avaliação da exposição e dos efeitos toxicológicos destes metais no organismo exposto.

4.2. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS EM CONTEXTOS REGIONAIS

O Gerenciamento de Áreas Contaminadas em contextos Regionais (GACR) deve ser estabelecido sempre que um evento de alterações e impactos em escala regional ocorra em função de ações antrópicas. O GACR, diferente do Gerenciamento de Área contaminadas (GAC) tradicionalmente utilizado para área bem delimitadas e com fontes de contaminação conhecidas e associadas a processos produtivos ali desenvolvidos, tem por finalidade o entendimento dos impactos a saúde humana e meio ambiente causados por contaminações que ocorram associados a uma determinada Fonte Primária de Contaminação (FPC) que gere contaminação ambiental ao longo de grandes extensões territoriais.

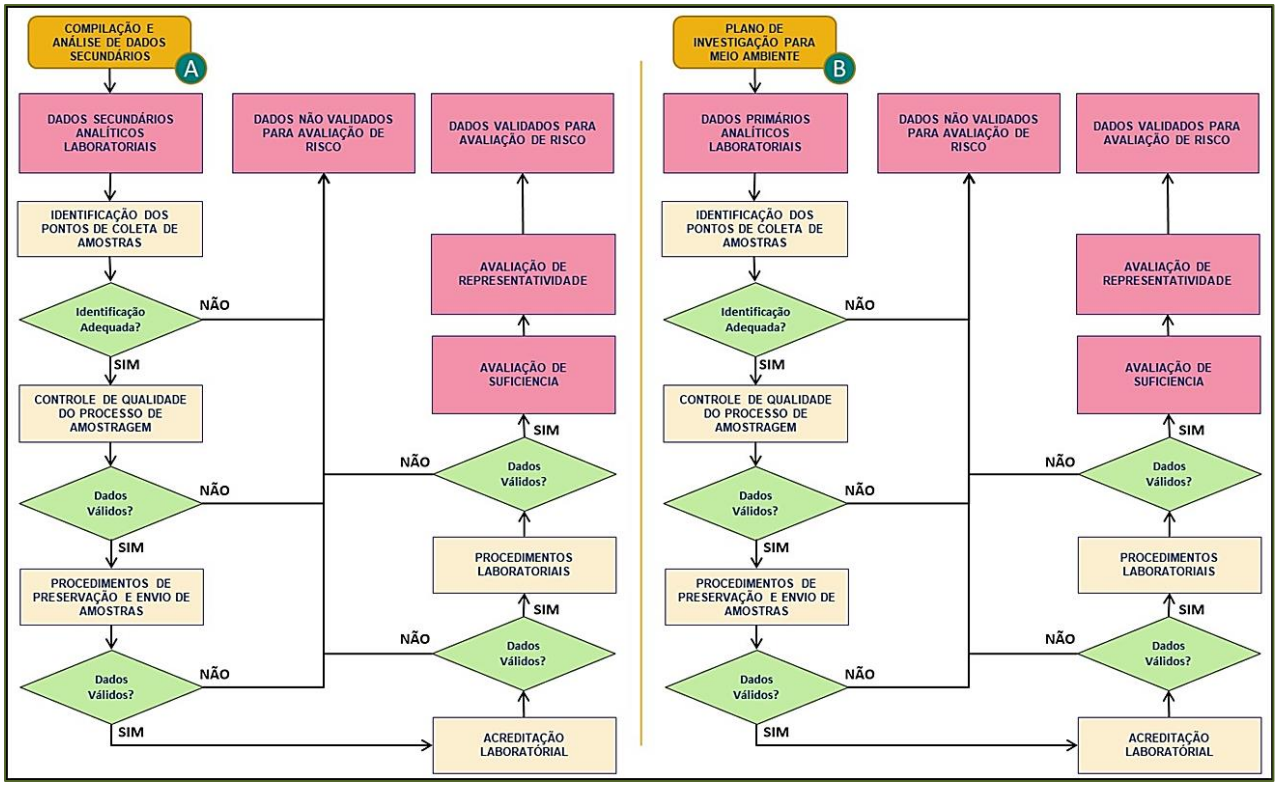
Eventos como rompimento de barragens de rejeito de minerações, contaminação de cursos d´água por processos industriais e operacionais, contaminação atmosférica continuada, contaminação marinha a partir da exploração de petróleo em águas profundas, são alguns exemplos de eventos regionais de alterações e impactos ambientais (ERAI). Esses eventos são caracterizados por atingir diferentes populações que possuem especificidades quanto ao uso e ocupação do solo (incluindo os Povos e Comunidades Tradicionais - PCT), diferentes ecossistemas com funções ecossistêmicas específicas, estarem em contato com diversas tipologias geológicas, pedológicas, morfológicas, hidrogeológicas, hidrológicas e geoquímicas, e , por fim, estarem associados a diversos cenários de exposição complexos e específicos de cada local potencialmente contaminado pelo ERAI.

Autores como Landis e Wiegers (2004) entendem que a avaliação de risco desenvolvida em escala regional deve incluir múltiplos hábitats, com diferentes agentes de estresse em pontos de exposição, além de diferentes características do meio físico que podem afetar a quantificação do risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Nesse contexto, ERAI devem obrigatoriamente ser gerenciados por estratégias técnicas que sejam capazes de diagnosticar as alterações e impactos ambientais por meio de avaliações e investigações que possuam estratégias regionais, estudos de Avaliação de Risco a Saúde Humana (ARSH) e Avaliação de Risco Ecológico (ARE) que estejam fundamentados em caminhos e cenários de exposição específicos considerando características locais, bem como estabelecer estratégias de remediação de áreas contaminadas por esses eventos que possuam sinergia com as características do meio físico e biótico de cada local a ser reabilitado.

A Figura 1 apresenta as etapas para o gerenciamento de áreas contaminadas em contextos regionais.

Figura 1 Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas em contextos Regionais (GAC$_R$).



4.2.1. FASES DO GACR

Conceitualmente, o Gerenciamento de Áreas Contaminadas em contextos Regionais deve ser desenvolvido em cinco fases consecutivas e interdependentes, conforme abaixo:

- FASE I – Consolidação de Dados Secundários e Avaliação Preliminar;
- FASE II – Investigação Ambiental Confirmatória e Detalhada;
- FASE III – Avaliação de Risco a Saúde Humana e Risco Ecológico;
- FASE IV – Plano de Intervenção Integrado para Saúde e Meio Ambiente;
- FASE V – Execução do Plano de Investigação desenvolvido na FASE IV.

O GACR é dimensionado para a consolidação inicial de dados pré-existentes (FASE I) e geração de novos dados e informações ambientais (FASE II). O levantamento de dados secundários e primários é realizado por meio de um rigoroso processo de controle de qualidade de validação e aquisição dados, visando o desenvolvimento de um Banco de Dados (BD) único, válido e integrado para os estudos de ARSH e ARE (FASE III), bem como desenvolvimento do Plano de Intervenção Integrado para Saúde e Meio Ambiente (FASE IV). O banco de dados integrado supramencionado será a base para execução individual das metodologias de Avaliação de Risco a Saúde Humana (ARSH) *RAGS Human Health* (USEPA, 1989) e Avaliação de Risco Ecológico (ARE) *RAGS Ecological Risk* (USEPA, 1997).

Neste contexto, os resultados, conclusões e recomendações das duas metodologias, serão consolidados e integrados no Plano de Intervenção Integrado para Saúde e Meio Ambiente. O referido plano tem como objetivo o dimensionamento de medidas de reabilitação/remediação ambiental, monitoramento ambiental com base no risco porventura identificado, controles institucionais, controles de engenharia, plano de gerenciamento e comunicação do risco.

As Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam, respectivamente, os fluxogramas de etapas de execução das FASES I, II, III e IV.

Figura 2 Fluxograma de execução da FASE I do GAC$_R$.

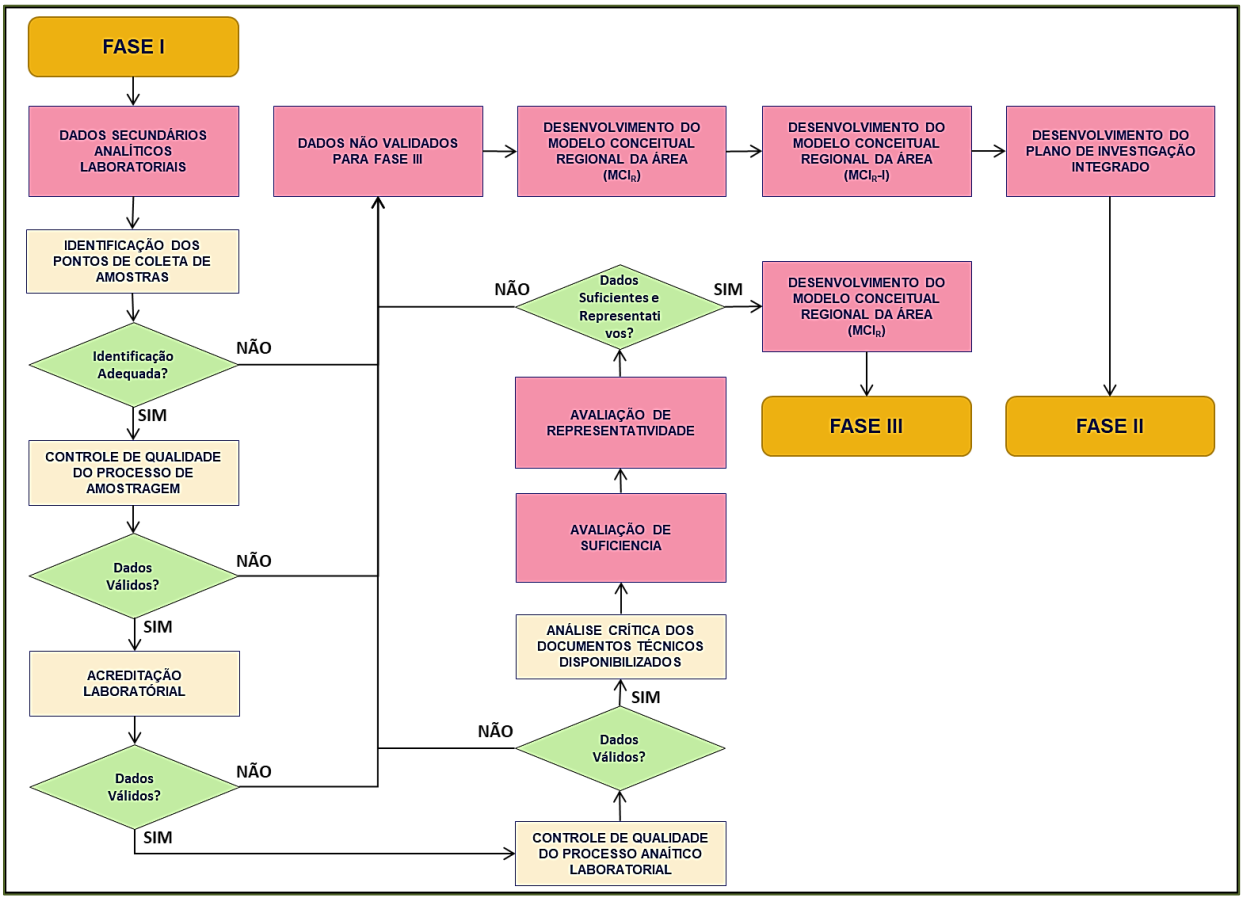


Figura 3 Fluxograma de execução da FASE II do GAC_R.

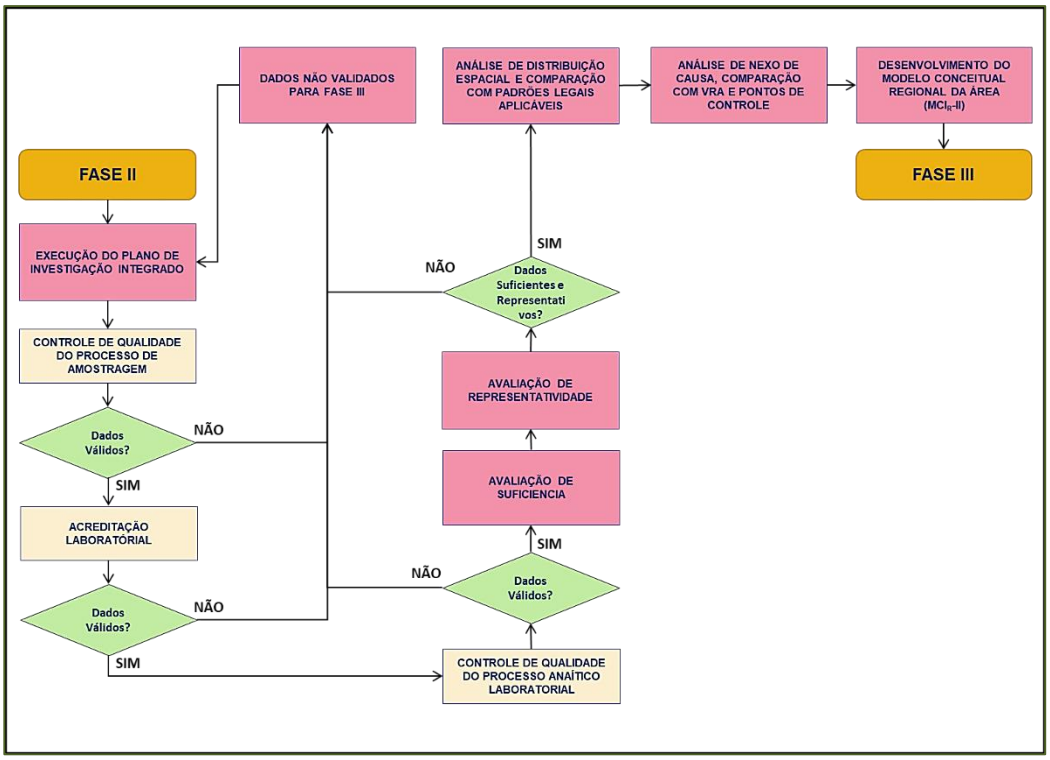


Figura 4 Fluxograma de execução da FASE III do GAC_R.

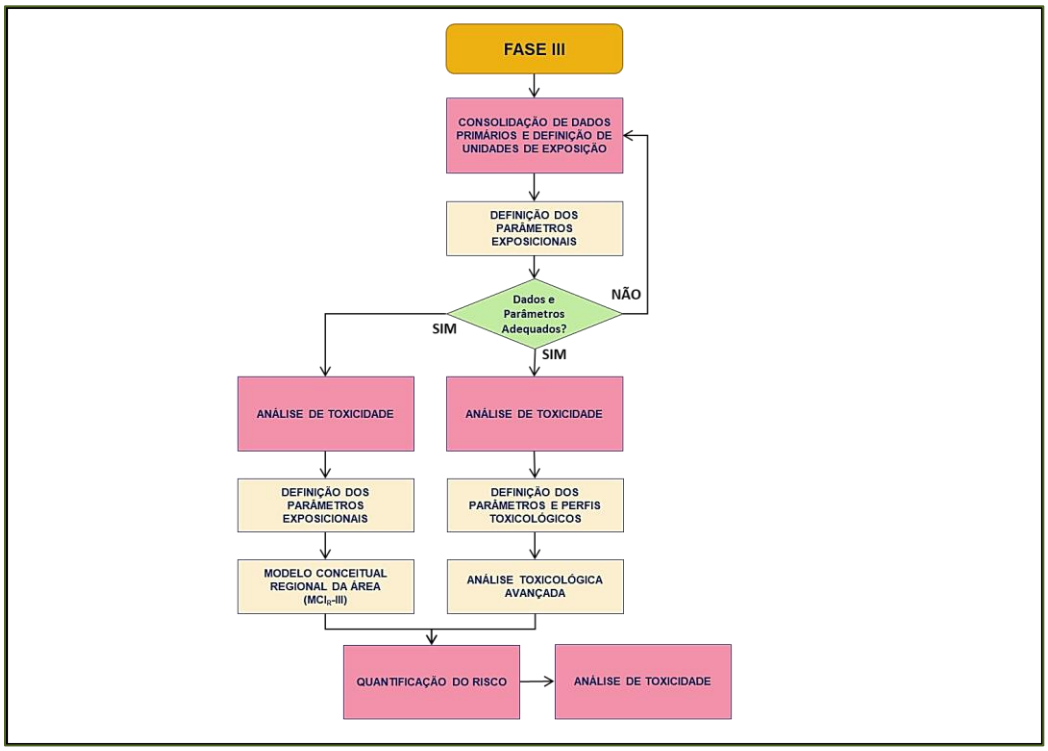
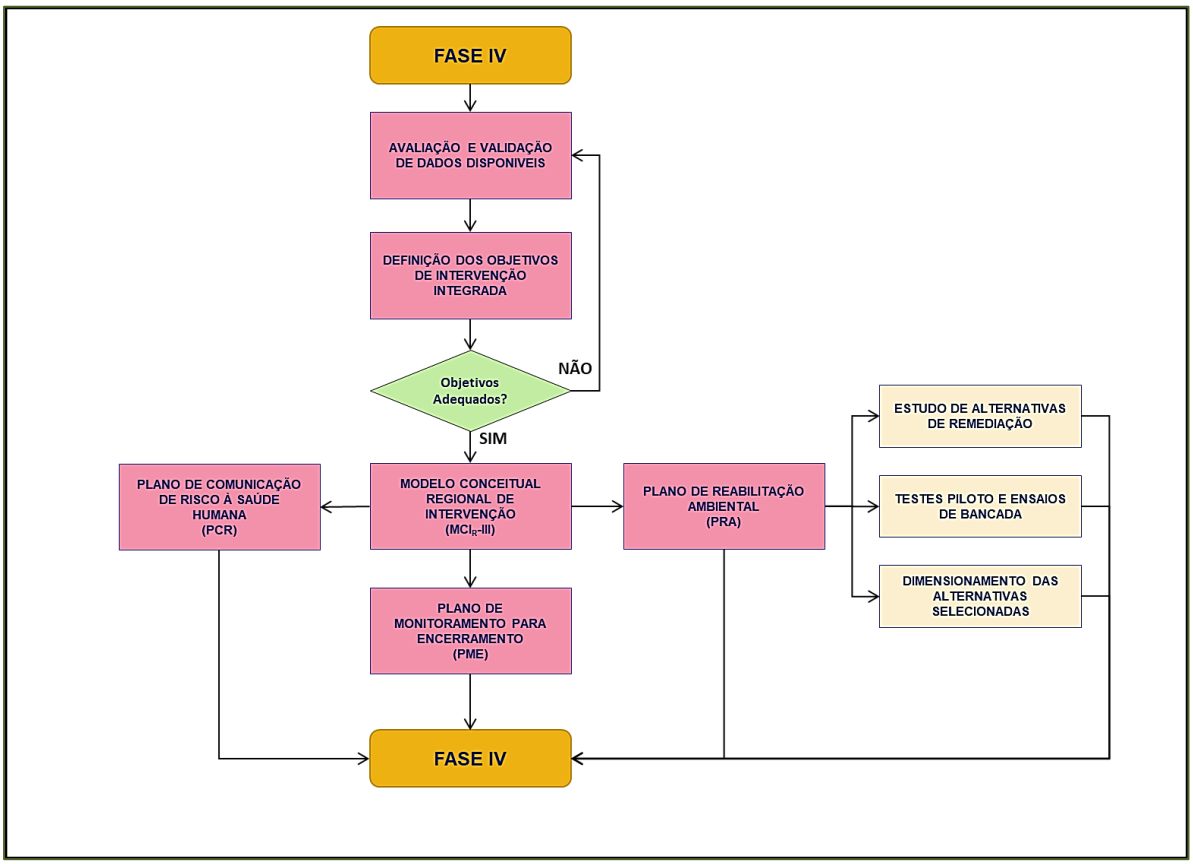


Figura 5 Fluxograma de execução da FASE IV do GAC_R.



5. PLANO DE INTERVENÇÃO PARA BACIA DO RIO PARAOPEBA

O Plano de Intervenção Integrado para Saúde e Meio Ambiente (PIISMA) desenvolvido na FASE IV do GACR, tem como objetivo consolidar todas as medidas de intervenção (controles institucionais, de engenharia e de remediação/reabilitação) e de monitoramento ambiental, a serem implementadas em locais determinados em função da ocorrência de um evento de alterações e impactos em escala regional associado a ações antrópicas. No presente capítulo será tratado o plano de intervenção considerando o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, localizadas no município de Brumadinho (MG).

As medidas de intervenção a serem definidas para o GACR devem estar alinhadas com o conceito descrito na Resolução CONAMA 420. Sendo assim, os produtos da FASE IV são:

- Modelo Conceitual de Intervenção (MCI_R);
- Plano de Reabilitação Ambiental (PRA);
- Plano de Monitoramento para Encerramento (PME);
- Plano de Comunicação de Risco à Saúde Humana (PCR).

As ações a serem definidas devem considerar, mas não se limitar, as informações e dados gerados e disponibilizados a partir dos estudos disponíveis e execução das fases

anteriores do GACR, visando estabelecer medidas de intervenção integradas de controle, monitoramento e mitigação da contaminação.

Adicionalmente, na FASE IV são dimensionados os planos de monitoramento para avaliação da eficiência/eficácia das medidas de remediação e reabilitação ambiental a serem implementadas conforme resultados obtidos na FASE III do GACR. Sendo assim, serão consideradas como metas remediação e reabilitação ambiental o risco cumulativo (carcinogênico e não carcinogênico) calculado por compartimento ambiental, as Concentrações Máximas Aceitável (CMA) e os Valores Máximos Permitidos (VMP).

As etapas de desenvolvimento do PIISMA são:

1. Avaliação de Dados Disponíveis;
2. Definição dos objetivos de intervenção integrada;
3. Definição do MCI_R;
4. Definição do PRA;
5. Definição do PME;
6. Definição do PCR.

Os objetivos de intervenção integrada serão definidos considerando a conclusão acerca da necessidade de adoção de medidas de remediação e reabilitação. Sendo assim, o presente capítulo tratará exclusivamente da avaliação e validação dos dados disponíveis para elaboração do PRA com base no MCIR.

5.1. AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS DISPONÍVEIS

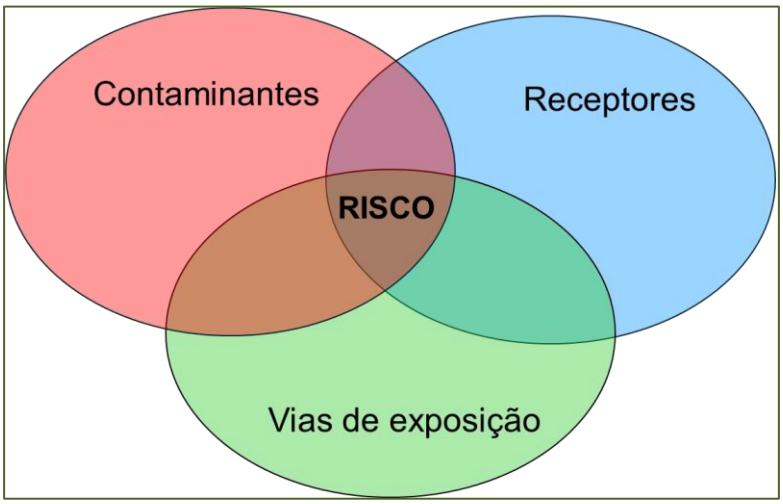
A avaliação de dados disponíveis, não deve se limitar às fases anteriores do GACR, devendo ser consultados outros documentos relacionados a outras atividades de remediação e reabilitação, estudos ambientais disponíveis, planos de monitoramento ambiental continuado executados nas regiões de interesse para a FASE IV, dentre outros dentre outros estudos que possam ser utilizados para composição do MCIR.

Conforme recomendado pelo Guidance for Data Useability in Risk Assessment - Part A (USEPA, 1992), para o desenvolvimento de planos de intervenção ambiental existe a necessidade de combinação de dados de diferentes fontes, considerando os seguintes critérios de comparabilidade: design amostral; temporalidade; espacialidade; métodos de preparação e conservação de amostras; metodologias de análise e limite de quantificação; lista de compostos analisados; comparabilidade estatística dos dados. O desenvolvimento do PIISMA está condicionado a validação e atendimento dos critérios citados acima para as diferentes fontes de dados a serem consideradas. Todos os dados validos serão considerados para o desenvolvimento adequado do MCI.

5.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DE INTERVENÇÃO INTEGRADA

Em projetos de CACR a definição dos objetivos de intervenção integrada deve ser definidos tomando-se como base o MCIR, o qual considera a inter-relação dos diferentes elementos, que em conjunto, caracterizam risco (Figura 6).

Figura 6 Interrelação de elementos que caracterizam o risco à saúde humana.



(Maximiano; Corsini, 2024).

Os objetivos da intervenção integrada devem ser definidos considerando as conclusões relacionadas a implantação de medidas de intervenção que combinem metas de reabilitação considerando a saúde humana e o meio ambiente, descritas e discutidas no MCIR. Com base nessa premissa, os seguintes objetivos podem ser adotados para a estruturação do PIISMA, quando aplicáveis:

I. Controlar as Fontes Primárias de Contaminação (FPC) e Fontes Secundárias de Contaminação (FSC);

II. Atingir o risco aceitável (RA) para receptores humanos identificados na fase de ARSH (FASE III);

III. Atingir o risco aceitável (RA) para os receptores ecológicos identificados na fase de ARE (FASE III);

IV. Controlar os riscos identificados com base nos Padrões Legais Aplicáveis (PLA).

A definição de estratégias técnicas para atingir os objetivos estabelecidos a partir da lista acima, deve estar alinhada com as necessidades regionais identificadas na avaliação e validação de dados disponíveis, e deve contemplar, mas não se restringir, a lista abaixo:

- A eliminação, contenção ou isolamento das FPC e FSC, quando presentes.
- A prevenção e controle da exposição dos receptores humanos e ecológicos, considerando:
- A eliminação de caminhos e Pontos de Exposição (PDE);
- Remoção ou deslocamento de receptores expostos;
- Remoção de massa de contaminantes presentes nos compartimentos do meio físico e mitigação de massa disponível para o meio biótico;
- Contenção, controle, mitigação e extinção, quando possível, das plumas de contaminação nos compartimentos do meio físico.

Os objetivos de intervenção integrada para eventos de alterações e impactos ambientais em escala regional, deverão ser a base que auxiliará no desenvolvimento do PIISMA.

5.3. MODELO CONCEITUAL DE INTERVENÇÃO

O modelo conceitual de intervenção (MCIR) deve ser elaborado baseado nas conclusões da fase de ARSH e ARE, bem como nos modelos conceituais desenvolvidos nessas fases de projeto. Também são fontes de dados e informação para desenvolvimento do MCIR a etapa de avaliação e validação dos dados disponíveis e na definição dos objetivos de intervenção integrada.

As limitações dos modelos conceituais desenvolvidos nos estudos de ARSH e ARE devem ser abordadas no modelo conceitual de intervenção ambiental para que as variações nas medidas de intervenção impostas pelas incertezas de dados e sensibilidades de cálculos das etapas anteriores ao PIISMA, sejam consideradas no desenvolvimento do MCIR para a região a ser reabilitada. Sendo assim, no MCIR devem ser consolidados os riscos teóricos adicionais quantificados na ARSH desenvolvida com base no *RAGS Human Health* (USEPA, 1989), e ARE desenvolvida com base no *RAGS Ecological Risk* (USEPA, 1997).

Nesse contexto, deve ser considerado que os elementos que comporão as medidas de intervenção integrada são:

- Tipos de medidas de intervenção (institucional, de remediação, de engenharia, de monitoramento e monitoramento alimentar, passíveis de serem utilizadas em contextos regionais de reabilitação;
- Caracterização, tipificação, e distribuição espacial regional das FPC e FSC;
- SQI para Intervenção e suas respectivas metas de reabilitação ambiental;
- Compartimento ambiental a serem alvo das medidas de intervenção integrada;
- Atualização das vias de ingresso, dos Ponto de Exposição (PDE) e dos receptores após a realização da FASE III dos estudos.

5.4. PLANO DE REABILITAÇÃO AMBIENTAL

Conforme descrito anteriormente, o Plano de Reabilitação Ambiental (PRA) deve considerar como metas remediação e reabilitação ambiental o risco cumulativo (carcinogênico e não carcinogênico) calculado por compartimento ambiental, as Concentrações Máximas Aceitável (CMA), ambos definidos pela ARSH, e os Valores Máximos Permitidos (VMP) definidos pela ARE.

O PRA deve ser dimensionado com base nas etapas de estudo de alternativas de remediação, testes piloto e de tratabilidade, e dimensionamento das alternativas de remediação escolhidas.

5.4.1. ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIAÇÃO

A elaboração de um estudo de alternativas de remediação para reabilitação de áreas contaminadas em escala regional envolve uma série de fatores que devem ser considerados na escolha das medidas de intervenção a serem adotadas. O processo de tomada de decisão deve ser realizado de forma clara e consistente tecnicamente, dentro de uma abordagem sistemática de avaliação, aplicabilidade e análise da relação custo-benefício entre as alternativas.

Conforme descrito por Bardos (2002), em revisão dos métodos de suporte à tomada de decisão para o gerenciamento de áreas contaminadas desenvolvida para CLARINET (*Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies*), os princípios gerais considerados para seleção de tecnologias de remediação podem ser:

- Gerenciamento do risco;
- Adequação e viabilidade técnica;
- Relação custo-benefício;
- Prazo de remediação;
- Efeitos colaterais (impacto ambiental);
- Satisfação das partes interessadas (*stakeholders*);
- Desenvolvimento sustentável.

A metodologia adotada para tomada de decisão apresentada nesse capítulo, é pautada nos princípios citados acima e, ao final da avaliação, a técnica de remediação que apresentar melhor eficiência técnica (maior taxa de mitigação das concentrações dos contaminantes de interesse), melhor relação custo-benefício e menor impacto ambiental pautado na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), será escolhida para dimensionamento com base em testes piloto de campo e de bancada em laboratório.

Nesse contexto, considerando a abordagem para impactos e alterações regionais, pode-se definir as seguintes fases de tomada de decisão para alternativas de remediação:

- definição do problema e identificação das soluções aplicáveis;
- avaliação das soluções aplicáveis;
- testes piloto e ensaios de bancada para as soluções selecionadas;
- dimensionamento.

5.4.1.1. ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIAÇÃO

Para balizar o processo de definição do problema e identificação de soluções que possam ser aplicadas satisfatoriamente para remediação das alterações e impactos ambientais causados por eventos regionais de contaminação, pode-se definir as seguintes etapas: (1) Análise Técnica; (2) Análises das exigências regulatórias; (3) Análise de viabilidade econômica; (4) Análise da viabilidade ambiental.

Conforme apresentador por Maximiano *et al.* (2013), o processo de identificação de soluções de reabilitação aplicáveis a áreas contaminadas, pode ser realizada a partir do funil de técnicas de remediação (Clark; Wheelwright, 1993). A estratégia definida por esses autores considera que o número de alternativas é gradualmente reduzido com a

aplicação das etapas definidas no parágrafo anterior, tomando como base critérios estabelecidos pelo especialista responsável pelo desenvolvimento do estudo de alternativas de remediação.

A aplicação da estratégia descrita acima, em conjunto com a definição do problema, levou a identificação da solução aplicável considerando a combinação (comboio técnico) de alternativas de remediação baseadas na fitorremediação e biorremediação. Maiores detalhes do processo de escolha de soluções de remediação para áreas contaminadas, considerando a estratégia de funil de técnicas, podem ser encontradas no Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (Maximiano; Teixeira; Moraes, 2013), capítulo 12 (Tomada de decisão e elementos técnicos para elaboração de planos de intervenção).

5.4.1.2. AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES APLICÁVEIS

Segundo RAM (Ram *et al.*, 1993), a eficiência das tecnologias remediação é dependente das características dos contaminantes de interesse, de características da área a ser remediada, de exigências dos órgãos reguladores e custos associados a sua operacionalização. Ainda segundo os autores, em muitos casos de reabilitação de áreas contaminadas, as técnicas de remediação são selecionadas por serem familiares e não porque são as mais indicadas e eficientes para uma determinada área a ser remediada.

Sendo assim, em projetos de remediação de impactos em escala regional, para dimensionar e implantar uma técnica ou a combinação de técnicas, torna-se indispensável a análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental, utilizando esse trinômio para descartar técnicas não aplicáveis a região a ser reabilitada, selecionando apenas aquelas que melhor se adequam às características do local e do contaminante.

5.4.1.2.1. FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é uma tecnologia emergente que utiliza plantas e seus microrganismos associados para remediação de solo, água ou ar contaminados. Pode ser aplicada no tratamento de áreas extensas afetadas por largo espectro de poluentes orgânicos e inorgânicos, como sais, metais, pesticidas e hidrocarbonetos de petróleo, às vezes, simultaneamente. É uma técnica de custo muito reduzido quando comparada a outras formas de remediação, podendo inclusive propiciar a produção de madeira, forrageiras ou de outros produtos vegetais que lhe agregam algum valor econômico (Andrade; Tavares; Mahler, 2007).

A técnica envolve mecanismos como:

- Fitoextração
- Fitotransformação ou Fitodegradação
- Fitovolatilização
- Fitoestimulação
- Fitoestabilização

A fitorremediação pode ser acompanhada por diversas técnicas *in situ*, em especial pela biorremediação, uma vez que há interação mútua entre as duas técnicas. Há relatos em diversos trabalhos de fitorremediação de poluentes orgânicos em que os principais

mecanismos envolvidos foram a rizoestimulação e fitodegradação. Esses mecanismos apresentam benefícios diretos, pois envolvem a detoxicação dos contaminantes no solo ou nos tecidos vegetais (Lima; Romagnano; Leite, 2013).

Considerando que as alterações e impactos regionais promovidos pelo rompimento das barragens da Mina Córrego do Feijão (estudo de caso do presente capítulo) estão relacionados prioritariamente aos metais, a fitoextração, fitoestabilização e fitovolatilização, principais mecanismos utilizados para esse grupo de contaminantes, serão as técnicas de remediação a serem detalhadas para a alternativa de fitoremediação.

A fitoextração possibilita remediar os solos contaminados pelos metais Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb e Zn. Ocorre sobretudo por meio de plantas hiperacumuladoras. Essas plantas são capazes de se desenvolver em ambientes contaminados, acumulando altas concentrações de metais sem mostrar redução significativa no crescimento. Segundo Baird (2002) e citado por Andrade; Tavares; Mahler (2007), o problema das plantas hiperacumuladoras de metais pesados é o seu crescimento vagaroso, o que indica um acúmulo lento de metais em sua fitomassa.

A fitoextração também pode ocorrer por rizofiltração, método em que as raízes de plantas são utilizadas para sorção, concentração e precipitação de contaminantes metálicos presentes nas águas superficiais ou subterrâneas. Dessa forma, as raízes podem sorver grandes quantidades de Pb e Cr da água do solo ou da água que passa em meio a densa zona radicular formada (USEPA, 1998).

A técnica da fitoestabilização de metais pode ocorrer por meio da adsorção, precipitação, complexação ou redução da valência do metal.

A fitovolatilização ocorre por meio da ascensão e transpiração do poluente pela planta e por sua liberação na atmosfera, em forma original ou modificada. Um dos caminhos para o aperfeiçoamento dessa forma de eliminação de metais é a criação de variedades transgênicas, aprimoradas para maior eficiência.

No rejeito proveniente do rompimento da barragem de Brumadinho, temos em sua composição, os metais majoritários, alumínio, ferro e manganês.

5.4.1.2.1.1. FITORREMEDIAÇÃO COM *RICINUS COMUNIS* L. (MAMONA)

As informações preliminares sobre a área definem o conjunto de particularidades para as possibilidades do emprego das técnicas de fitorremediação, que basicamente poderão advir do estímulo natural dos processos de atenuação já promovidos e reconhecidos pela vegetação local e/ou pela inserção de espécies novas ou já ocorrentes na área.

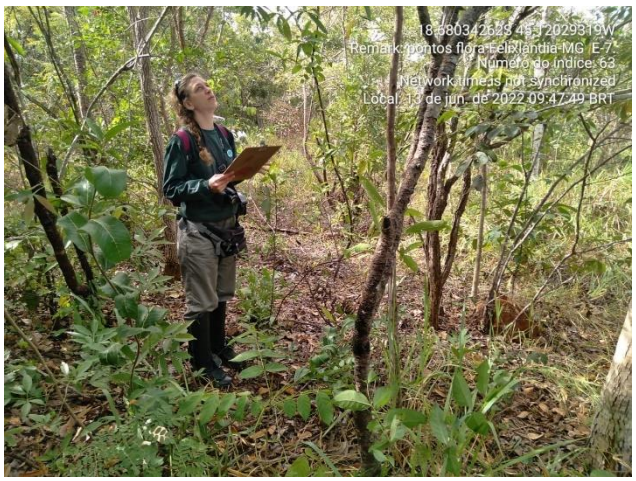
Assim, cinco etapas são recomendadas para definir ações específicas pelo reconhecimento e estímulo dos processos de atenuação promovidos pela vegetação local ou inserida na área:

1. caracterização ambiental e diagnóstico da área;
2. caracterização preliminar da flora ocorrente na área;
3. levantamento bibliográfico de espécies vegetais e técnicas adicionais fitorremediadoras dos contaminantes específicos;

4. pesquisa para validação dos processos de fitorremediação sob as caraterísticas da área;
5. aplicação das fitotécnicas (*in situ*, *on site*, *ex situ*).

Durante as Fases I e II dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Risco Ecológico na bacia do rio Paraopeba em Brumadinho (MG), foram realizadas as etapas 1) caracterização ambiental e diagnóstico da área; 2) caracterização preliminar da flora e; 3) levantamento bibliográfico de espécies vegetais. Essas etapas se deram através de levantamentos de estudos ambientais previamente realizados na área, antes e após, o rompimento da Barragem de Brumadinho. A caracterização preliminar da flora da região, foi realizada com base em observações de campo e levantamento bibliográfico (Figura 7 e 8).

Figura 7 e 8 Avaliação preliminar da flora da região em campo.



Fonte: Grupo EPA (2022).

O levantamento bibliográfico apontou um grande potencial na utilização das plantas *Ricinus communis L.*, para fitorremediação de áreas degradadas por rejeito de mineração.

Em trabalho desenvolvido por Wagner *et al.* (2022), foi avaliado o potencial fitorremediador da espécie *Ricinus communis* L. (Mamona), *ex situ*, em solo contaminado por rejeito de minério de Ferro, oriunda da localidade de Minas do Camaquã, distrito de Caçapava do Sul, RS. Nesse estudo foi avaliado parâmetros de crescimento, alterações fisio-morfológicas e potencial de fitroextração da espécie *Ricinus communis* cultivadas em diferentes solos em 90 dias de crescimento. Os grupos submetidos à solos contaminados por rejeito não exibiram sintomas de toxidez, e apresentaram parâmetros de crescimento normais ou até positivos quando comparadas ao solo controle. Apesar de a espécie não ter demonstrado bioacumulação significativa, teve fatores de translocação e bioacumulação positivos. Desse modo, a *Ricinus communis* se mostrou promissora como fitorremediadora para a área em estudos.

Um estudo de caso relevante de área contaminada por metais pesados refere-se à poluição de Santo Amaro da Purificação, no Recôncavo Baiano. Pesquisas existentes comprovam a eficiência da Mamona (*Ricinus communis, L.*) na fitorremediação de solos

contaminados por metais pesados apresentando altos teores radiculares, caulinares e foliares destes metais. O resultado do estudo de fitorremediação usando a Mamona demonstrou que é uma ferramenta eficaz para a recuperação de ambientes contaminados por metais pesados (Viana; Anjos, 2012).

Assim, para o presente estudo de viabilidade, optou-se por seguir com o planejamento, condução e avaliação de experimentos e em escala piloto com a *Ricinus communis L*.

O teste piloto, *in situ*, deverá ser realizado utilizando amostras de solo contaminado da área de estudo e, assim, verificar se as plantas *Ricinus communis L*. são de fato capazes de promover a remediação dos contaminantes ou se serão necessárias medidas prévias a sua aplicação.

Para a aplicação da fitorremediação tanto em teste piloto como em larga escala, será necessária infraestrutura e requisitos de preparação do local semelhantes ao exigido pela maioria dos projetos de remediação, como a terraplanagem do terreno e sistemas de drenagem de águas pluviais. Além da preparação do terreno, a instalação de sistema de irrigação e manutenção periódica dos nutrientes do solo por adubagem muitas vezes é necessária para assegurar a germinação e desenvolvimento vigorosos das plantas.

O crescimento, desenvolvimento e saúde das plantas tem influência direta na capacidade do sistema de realizar a remediação pretendida. Por isso, as partes aéreas e sistemas radiculares das plantas deverão ser monitorados durante todo o projeto, a fim de verificar possíveis efeitos deletérios ocasionados pela contaminação.

Da mesma maneira, deverão ser monitoradas as taxas de transpiração e deve-se realizar coletas periódicas de ar a fim de verificar a ocorrência de contaminação atmosférica oriunda dos mecanismos fisiológicos do vegetal (USEPA, 2001). É importante também acompanhar as condições climáticas locais que podem de alguma forma afetar o crescimento da vegetação, como temperatura, umidade relativa do ar e níveis de radiação solar (ITRC, 2009).

Coletas periódicas de tecidos vegetais deverão ser realizadas visando obter dados de acompanhamento sobre o desempenho da remediação. Havendo o acúmulo considerável de contaminantes nos tecidos, é necessária a remoção do material vegetal pós-tratamento e destinação adequada desse material.

5.4.1.2.2. BIORREMEDIAÇÃO

Os microrganismos podem desempenhar um papel significativo na mitigação ou remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos do ambiente. Seu metabolismo é dependente da disponibilidade de aceptores e doadores de elétrons, nutrientes essenciais e íons necessários para o crescimento. Durante a evolução, os microrganismos desenvolveram diferentes mecanismos de captação e transformação de contaminantes, bem como estratégias para a sua imobilização ou mobilização (Antizar-Ladislao *et al.*, 2004).

A versatilidade metabólica dos microrganismos permitiu a exploração de seu potencial em remediar áreas impactadas com diferentes contaminantes nos processos chamados de biorremediação. Nesse capítulo, o foco de discussão refere-se à biorremediação microbiana, que explora a habilidade de microrganismos e/ou suas enzimas em reduzir a concentração (massa) e/ou a toxicidade de um grande número de

contaminantes, tais como derivados de petróleo, PAHs (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos), PCBs (Bifenilas Policloradas), pesticidas clorados como o HCH (Hexaclorociclohexano) e metais pesados.

A biorremediação é um processo em que organismos vivos são responsáveis por reduzir ou transformar especialmente os poluentes xenobióticos (agrotóxicos, corantes, fármacos, polímeros e resíduos plásticos) de áreas contaminadas, por meio de processos biológicos de degradação. Estudos mostram que, devido à complexidade química dos diferentes contaminantes, um processo de biorremediação bem-sucedido é dependente da diversidade microbiana existente, a qual pode ser explorada através da aplicação de consórcios microbianos nas estratégias de tratamento proposto.

A biodegradação pode ocorrer via metabolismo principal, sendo que nesse processo os microrganismos utilizam o contaminante para a sua multiplicação, como fonte de carbono/nutriente e/ou energia (respiração). Muitas vezes pode ocorrer a mineralização do contaminante, reduzindo-o aos seus constituintes mais simples como CO2, H2O e sais (Alexander, 1994; Borja *et al.*, 2005; FIeld; Sierra-alvarez, 2008).

Por outro lado, a transformação do contaminante pode ocorrer por cometabolismo, processo no qual um composto é fortuitamente degradado por enzimas ou cofatores ativos no metabolismo de outros substratos, em princípio sem gerar benefício para o microrganismo. Sendo assim, é necessário um substrato primário como fonte de carbono e, se o produto do cometabolismo for de difícil degradação, esse metabólito pode acumular no ambiente, podendo ou não causar danos. Essa forma de biodegradação evidencia a importância da diversidade microbiana, visto que uma espécie pode vir a transformar o produto de cometabolismo de outra, até se alcançar, eventualmente, a mineralização do composto (Alexander, 1994; Borja *et al*., 2005; Field; Sierra-Alvarez, 2008).

Dentre as principais dificuldades para o tratamento biológico de solos contaminados, podemos apontar:

a) Heterogeneidade do rejeito - os rejeitos são distribuídos de modo heterogêneo (diferente) no solo e o contaminante pode ocorrer em formas não acessivas para a compostagem;

b) Concentração do contaminante - contaminantes podem estar presentes em concentrações variadas (de muito baixa a muito alta). Se muito alta, pode ser tóxica e inibir o crescimento dos microrganismos decompositores;

c) Persistência e toxicidade - tratamentos biológicos são eficientes para remover matérias biodegradáveis e de baixa toxicidade;

d) Contaminantes resistentes à biodegradação exigem adequação nutricional do solo (com fonte de Carbono) e consórcios microbianos;

e) Condições adequadas para o crescimento microbiano - atividade microbiana suficiente para promover degradação adequada exige condições ambientais favoráveis passíveis de desintoxicação por biorremediação, como por exemplo, umidade, temperatura e aeração do solo.

5.4.1.2.2.2. BIORREMEDIAÇÃO COM *PSEUDOMONAS spp*.

Pela gravidade e amplitude do desastre ocorrido na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, o que reforça a importância de efetivos estudos para a implantação de biorremediação por bactérias em rejeitos de mineração. A aplicabilidade dos procedimentos de biorremediação demonstra-se uma metodologia eficiente em experimentos in vitro que deverão ser acompanhadas e controladas levando-se em consideração a recuperação ambiental das áreas degradadas.

Chegou-se à definição da utilização de biorremediação com uso das bactérias *Pseudomonas sp*. e *Bacillus sp*. e três metais especificamente: manganês, ferro e cobre, delimitados com base na revisão bibliográfica.

Segundo Silver (1996) e citador por Silva e colaboradores (2016), além destes, gêneros outros são destaque, como *Pseudomonas, Burkholderia, Bacillus* e *Rhizobium*, esses microrganismos apresentam metabolismo oxidativo de minerais atuando de maneira importante na biorremediação de cobre, crômio, níquel e zinco.

O gênero *Pseudomonas* é um gênero bacteriano gram-negativo amplamente distribuído na natureza, conhecido por sua capacidade metabólica diversificada e adaptabilidade a diferentes ambientes. No âmbito da biorremediação de solos contaminados com metais tóxicos, a *Pseudomonas* tem se destacado devido à sua tolerância e resistência a altas concentrações desses poluentes, além de suas habilidades em solubilização, imobilização, complexação, oxidação e redução dos metais presentes (Snak, 2024).

Um estudo relevante realizado por Miller *et al.* (2009a) e citado por Snak (2024), avaliou a eficácia da bactéria *Pseudomonas putida* KT2440 na biorremediação de solos contaminados com Cd. Os resultados mostraram que a *Pseudomonas putida* KT2440 foi capaz de reduzir eficientemente a concentração de cádmio no solo, através de processos de complexação e oxidação-redução, promovendo a remediação do solo contaminado. (Miller *et al*., 2009b).

Outra pesquisa relevante foi conduzida por (Zhou *et al.*, 2020), que investigou a capacidade da *Pseudomonas* para a biorremediação de solos contaminados com chumbo. Os resultados demonstraram que a bactéria *Pseudomonas spp.* foi capaz de promover a solubilização e imobilização do chumbo no solo, reduzindo significativamente a disponibilidade desse metal tóxico para os organismos vivos.

Além disso, estudos têm demonstrado que a *Pseudomonas* é capaz de produzir e liberar sideróforos, substâncias orgânicas de baixo peso molecular capazes de quelar íons metálicos, facilitando assim a mobilização e a absorção desses metais pelas plantas. Um exemplo é o estudo de Hussain *et al.* (2022), que investigou a capacidade da *Pseudomonas* para a biorremediação de solos contaminados com Zn. Os resultados indicaram que a bactéria *Pseudomonas spp.* produziu sideróforos que aumentaram a disponibilidade de zinco para a planta *Arabidopsis thaliana*, facilitando sua absorção e minimizando os efeitos tóxicos desse metal (Hussain *et al.*, 2022)

O estudo de Tangahu *et al*. (2011) e citado por Snak (2024) investigou o papel da bactéria *Pseudomonas putida* na biorremediação de solos contaminados com chumbo, cádmio e zinco. Os resultados revelaram que a *Pseudomonas putida* apresentou uma alta resistência a metais tóxicos e foi capaz de remover efetivamente esses metais do solo, sugerindo seu potencial como um agente de biorremediação em solos contaminados.

Por fim, um estudo conduzido por Parvatiyar *et al*. (2005) investigou a capacidade da bactéria *Pseudomonas aeruginosa* para a biorremediação de solos contaminados com As. Os resultados mostraram que a *Pseudomonas aeruginosa* foi capaz de solubilizar e imobilizar o arsênio presente no solo, reduzindo significativamente sua toxicidade e oferecendo uma estratégia promissora para a remediação de solos contaminados com arsênio (Parvatiyar *et al*., 2005).

Portanto, as pesquisas mencionadas evidenciam o potencial da bactéria *Pseudomonas* na biorremediação de solos contaminados com metais tóxicos. A capacidade da *Pseudomonas* em solubilizar, imobilizar, complexar, oxidar e reduzir esses metais é fundamental para a remediação ambiental. Além disso, a produção de sideróforos pela *Pseudomonas* contribui para o aumento da disponibilidade desses metais para as plantas, facilitando sua absorção e promovendo a fitorremediação.

5.4.2. TESTES PILOTOS E ENSAIOS DE BANCADA

5.4.2.1. FITORREMEDIAÇÃO

Como qualquer outro processo de remediação, a aplicação da fitorremediação objetiva a redução das concentrações de contaminantes a níveis seguros e compatíveis com a proteção da saúde humana, além de impedir e dificultar a disseminação de substâncias nocivas ao meio ambiente. Dessa forma, as limitações à sua aplicação devem ser criteriosamente avaliadas considerando as condições e urgências que acarretam à área contaminada, tais como:

- variação do tempo e da eficiência de remediação das espécies vegetais;
- complexidade das medições das taxas de fitorremediação;
- variações nas taxas e eficiência das fitotécnicas conforme condições ambientais;
- complexidade do monitoramento dos componentes envolvidos;
- modificações intrínsecas nas propriedades físicas e químicas do solo e dos contaminantes quando na própria aplicação das fitotécnicas;
- possibilidade de produção de metabólitos secundários e formas intermediárias de contaminantes pelas plantas;
- dificuldade da extrapolação dos modelos desenvolvidos em casa de vegetação para o campo (USEPA, 2001; ITRC, 2009).

As inúmeras e interdependentes variáveis envolvidas na fitorremediação tornam a aplicação da tecnologia mais complexa, mas não impeditiva sendo necessário apenas elencar critérios de monitoramento para garantir os objetivos do plano de remediação na área contaminada.

Os principais componentes a serem remediados em uma área contaminada só podem ser definidos após a realização de estudos preliminares como será discutido adiante.

Amostras de tecidos vegetais podem ser utilizadas para apontar fontes emissoras e o destino dos contaminantes (biomonitoramento), ajudar a redefinir locais para novas perfurações exploratórias ou para outras técnicas de investigação convencionais, e para determinar potenciais espécies para aplicações futuras *in situ*.

Além do seu potencial remediador, a fitorremediação também deve ser vista como forma de recuperação de áreas, adicionando ou complementando benefícios não incluídos por técnicas convencionais, como a redução de processos erosivos e a formação de barreiras naturais que impedem o carreamento e lixiviação da contaminação.

5.4.2.2. BIORREMEDIAÇÃO

Para a aplicação do processo de biorremediação vários fatores devem ser considerados, como:

1. condições físicas, químicas e biológicas do local contaminado;
2. concentração do contaminante;
3. tempo requerido para a degradação ou a remoção do composto alvo, conforme a técnica empregada e;
4. custo total para aplicação do processo escolhido.

Segundo Boopathy (2000), o sucesso da biorremediação depende da presença de microbiota adequada no lugar certo e, de fatores ambientais propícios para que ocorra a degradação. Essa microbiota é constituída principalmente por bactérias e fungos com capacidade metabólica e fisiológica para degradar o contaminante. Em relação ao custo e ao impacto ambiental da aplicação da tecnologia, a biorremediação apresenta várias vantagens sobre as técnicas convencionais de tratamento tais como deposição em aterro e incineração.

Deve-se ressaltar que a aplicação da tecnologia de biorremediação também enfrenta uma série de limitações relacionadas a diferentes fatores, entre os quais estão as características da matriz contaminada (solo arenoso, solo argiloso, água do mar, entre outros), o contexto geológico da matriz (profundidade, temperatura, saturação) e o tipo de contaminante. As propriedades físicas, químicas e microbiológicas dos solos e as condições climáticas também podem alterar a taxa de biodegradação. Em solos argilosos ou com baixa permeabilidade, por exemplo, a utilização da biorremediação é dificultada (Macedo *et al*., 2002).

Adicionalmente aos problemas técnicos para a viabilização da estratégia de bioaumentação no tratamento de áreas contaminadas, deve-se considerar as permissões legais apoiadas na legislação local.

5.4.3. DIMENSIONAMENTO

5.4.3.1. PROJETO

O projeto básico de uma técnica ou conjunto de técnicas de remediação utilizadas para remediação de alterações e impactos causados por eventos de contaminação em escala região, deve conter os elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado, para atingir as metas de remediação previamente definidas. Sendo assim, o projeto básico de remediação por fitorremediação e biorremediação deve conter os seguintes elementos:

- Detalhamento conceitual e técnico das soluções de remediação de forma a fornecer visão de todos os aspectos conceituais que envolverão a aplicação das técnicas

considerando a fitorremediação pela utilização da *Ricinus comunis* L., e biorremediação com *Pseudomonas spp*;

- Detalhamento dos resultados dos testes piloto em campo e dos ensaios de bancada realizados para o dimensionamento adequado das soluções de remediação;
- Definição das necessidades de materiais, insumos e equipamentos, descrevendo de forma detalhada sua especificação, dimensionamento, quantitativos, custos e prazos e protocolos utilização;
- Definição da necessidade de estrutura física para acondicionamento e tratamento e utilização de mudas, material biológico, bem como especificações para acondicionamento temporário e destinação final dos resíduos gerados durante o processo de remediação e após a remediação, considerando a retirada e destinação do plantio utilizado para fitorremediação das regiões de interesse para reabilitação;
- Cronograma físico-financeiro de implantação, operação e desmobilização das técnicas de remediação.

O projeto básico das medidas de remediação por fitorremediação associada a biorremediação, deve ser desenvolvido com base em padrões normativos da ABNT para apresentação de projetos de engenharia, haja vista que atualmente não há um padrão para apresentação de projetos de remediação.

5.4.3.2. CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

5.4.3.2.1. FITORREMEDIAÇÃO

A estimativa dos custos de implantação, do montante de investimentos em equipamentos e instalações (capital expenditure, capex) e aqueles associados à manutenção e aos gastos de consumíveis e outras despesas operacionais (operational expenditure, opex) relacionadas à fitorremediação devem considerar alguns fatores, como:

- aqueles característicos às espécies vegetais escolhidas, como disponibilidade e formas de aquisição de sementes, idade e origem de mudas, preço e disponibilidade das mudas no mercado;
- as condições ambientais, como a disponibilidade e a qualidade de recursos hídricos e edáficos, e
- as concentrações, formas de dispersão e heterogeneidade da contaminação da área.

Esses fatores combinados tornam o cálculo das estimativas de custos associados à fitorremediação mais complexo, pois em cenários de contaminações reais é comum o histórico de deposições irregulares e variáveis, sendo que os tipos e as concentrações de contaminantes, as características físico-químicas, hídricas e edáficas são heterogêneas e envolvem diferentes compartimentos e situações de contaminação na mesma área.

São muitas as particularidades das técnicas de fitorremediação que contribuem para que esta seja uma tecnologia alternativa de baixo impacto ambiental e economicamente viável, principalmente quando são aplicadas *in situ*, sob energia solar e

que faz uso de equipamentos e materiais simples comuns à agricultura (Cunningham *et al.,* 1996).

5.4.3.2.2. BIORREMEDIAÇÃO

A biorremediação pode permitir a eliminação de contaminantes permanentemente (inclusive passivos persistentes) e apresenta boa aceitação pública, o que pode favorecer a regulamentação para sua aplicação. A tecnologia de biorremediação pode ainda ser explorada em conjunto com outros métodos de remediação, incluindo os tratamentos químicos ou físicos.

Segundo Viladi (2001), Gavrilescu (2005) e citado por Leo Alli *et al.* (2014), quando aplicada *in situ*, a biorremediação tem como benefícios menores custos, quando comparada com processos térmicos e químicos, além de promover mínima perturbação do entorno do ambiente contaminado.

Outro aspecto limitante refere-se à viabilidade econômica e logística para a realização de pesquisas e acompanhamento técnico adequado e com recursos humanos treinados. Existe uma grande complexidade para a extrapolação dos estudos em escala de bancada e piloto para as operações em campo, novas pesquisas ainda são necessárias para desenvolver estratégias de biorremediação apropriadas para áreas com misturas complexas de contaminantes.

REFERÊNCIAS

[1] ALEXANDER, M. **Biodegradation and bioremediation.** San Diego: Martin Alexander Academic Press, 1994.

[2] ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. L. R.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação – O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. [s.l.] Oficina de Textos, 2007.

[3] ANTIZAR-LADISLAO, B.; GALIL N. I. **Biosorption of phenol and chlorophenols by acclimated residential biomass under bioremediation conditions in a sandy aquifer**. Water Research, v. 38, n. 2, p. 267-276, Jan. 2004.

[4] BARDOS, P. **Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies - CLARINET**. 1. ed. [s.l.] Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies, 2002.

[5] BOOPATHY, R. **Factors limiting bioremediation technologies.** Bioresource Technology, v. 74, n. 1, p. 63-67, Aug. 2000.

[6] BORJA, J.; TALEON, D. M.; AURESENIA, J.; GALLARDO, S. **Polychlorinated biphenyls and their biodegradation, Process Biochem**. v. 40, n. 6, p. 1999–2013, May 2005.

[7] CETESB. DD 038/2017/C. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. **São Paulo**. 2017.

[8] CHEN H; CROSTA G. B. C.; LEE F. **Erosional effects on runout of fast landslides, debris flows and avalanches: a numerical investigation**. Italy: Géotechnique, 2006.

[9] CLARK, K. B.; WHEELWRIGHT, S. C. Managing new product and process development: text and cases. **New York: Free Press**, 1993.

[10] CONAMA. **"Resolução Nº 357".** Brasil, 17 mar. 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acessado em: 27 ago. 24.

[11] CONAMA. "**Resolução nº 396**". Brasil, 3 abr. 2008 que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

[12] CONAMA. **"Resolução Nº 420"**. Brasil, 28 dez. 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/17/2017/02/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2024

[13] COPAM/CERH. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02. **Minas Gerais**. 2010.

[14] CPRM. **Boletim de monitoramento compartilhado do rio Paraopeba ruptura da barragem do Complexo do Feijão em Brumadinho - MG**. Brasil: Serviço Geológico do Brasil, 2020 2019.

[15] FIELD, J. A.; SIERRA-ALVAREZ R. **Microbial degradation of chlorinated benzenes**. Biodegradation, v. 19, n. 4, p. 463-480, July 2008.

[16] GRUPO EPA (2021). **Projeto Detalhado dos Estudos de ARSH – Plano de Gestão Ambiental Integrada.** Bacia do Rio Paraopeba – Brumadinho – MG.

[17] GRUPO EPA (2022). **Relatório de Fase I – Ecológico. Estudos de Avaliação de Risco Ecológico. Área de Estudo Ecologica C (AEECO-C)**. Outubro de 2022.

[18] GRUPO EPA (2024). **Projeto Detalhado dos Estudos de ARSH - Meio Ambiente V-12. Bacia do Rio Paraopeba** – Brumadinho – MG.

[19] HUSSAIN, S. et al. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 900740, 31 maio 2022.

[20] ITRC (2009). **"Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised"**. Prepared by The Interstate Technology & Regulatory Council Phytotechnologies Team.

[21] LANDIS, W. G. (ED.). **Regional Scale Ecological Risk Assessment: Using the Relative Risk Model**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

[22] LEO, P.; ALLI, R. C. P.; LINHARES, D. C. L.; SILVA, E. S.; MATSUBARA, R. M. S.; RODRIGUES, M. F. A. Processos biológicos: biorremediação. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas.** 2014.

[23] LIMA, A. L.; ROMAGNANO, L. F.; LEITE, D. C. Processos biológicos: fitorremediação. Em: **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 1. [s.l: s.n.].

[24] LIMA, R. E. An anthropogenic flow type gravitational mass movement: the Córrego do Feijão tailings dam disaster, Brumadinho, Brazil. **Springer Nature**, 2020.

[25] MACEDO, R. C.; BERBERT, V. H. C.; LEMOS, J. L. S.; TRINDADE, P. V. O.; RIZZO, A. C. L. **Biorremediação de solos impactados por óleo cru utilizando fungos filamentosos**. Disponível em: < http://mineralis.cetem.gov.br › cetem › Victor. Acessado em 08.08.2024.

[26] MAMBRETTI S; LARCAN E; DE WRACHIEN D. **1D modelling of dam-break surges with floating debris**. Italy: Biosyst Eng, 2008.

[27] MAXIMIANO, A. M. S.; CORSINI, M. J. **Projeto Detalhado dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana (Meio Ambente) - Bacia do Rio Paraopeba (MG)**. Grupo EPA - Engenharia de Proteção Ambiental Ltda., 2024.

[28] MAXIMIANO, A. M. S.; TEIXEIRA, C. E.; MORAES, S. L. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 1. ed. [s.l.] IPT e BNDES, 2013. v. 1

[29] MILLER, C. D. et al. Copper and cadmium: responses in *Pseudomonas putida* KT2440. **Letters in Applied Microbiology**, v. 49, n. 6, p. 775–783, dez. 2009a.

[30] MILLER, C. D. et al. Copper and cadmium: responses in *Pseudomonas putida* KT2440. **Letters in Applied Microbiology**, v. 49, n. 6, p. 775–783, dez. 2009b.

[31] MORAES, S. L.; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. S. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2014. 398 páginas.

[32] PARVATIYAR, K. et al. Global Analysis of Cellular Factors and Responses Involved in Pseudomonas aeruginosa Resistance to Arsenite. **Journal of Bacteriology**, v. 187, n. 14, p. 4853–4864, jul. 2005.

[33] RAM, N. M. et al. A decision framework for selecting remediation technologies at hydrocarbon-contaminated sites. **Journal of Soil Contamination**, 1993.

[34] RICO, M.; BENITO, G.; DIEZ-HERRERO, A. **Floods from tailings dam failures**. Spain: Journal of

Hazardous Materials, 2008.

[35] ROCHE, C.; THYGESEN, K.; BAKER, E. **Mine tailings storage: safety is no accident. A UNEP Rapid Response Assessment.** Dinamarca: United Nations Environment Programme and GRID- Arendal, 2017. Disponível em: <www.grida.no>.

[36] SHARMA, S. **Bioremediation: features, strategies and applications.** Asian Journal of Pharmacy and Life Science, v. 2, n. 2, p. 202-212, Apr./June 2012.

[37] SILVA, W. P. D.; GOMES, R. C. **Tailings liquefaction analysis using strengh ratios and SPT/CPT results**. São Paulo: Soil and Rocks, 2013.

[38] TEC3. **Estudo Conceitual Mina Córrego do Feijão Modelo Prognóstico de Qualidade de Água**. Brasil: TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, 2020.

[39] USEPA. **Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Human Health Evaluation Manual**. United State Environmental Protection Agency (USEPA), , 1989. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2024

[40] US.EPA - United State Environmental Protection Agency. 1991. **"Guidance for Data Useability in Risk Assessment (Part A)"**. Washington, DC. Dezembro de 1991.

[41] USEPA. **Guidance for Data Useability in Risk Assessment - Part A**. Office of Emergency and Remedial Response, 1992. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/datause-parta.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024

[42] USEPA. **Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments - Interim Final**. United State Environmental Protection Agency (USEPA), 1997.

[43] US.EPA - Environmental Protection Agency (1998). **"Guidelines for Ecological Risk Assessment"**. Washington, DC. Maio de 1998.

[44] US.EPA - Environmental Protection Agency (2007). **Framework for Metals Risk Assessment**. Washington, DC, EPA 120/R-07/001. Março de 2007.

[45] US.EPA - Environmental Protection Agency. 2011. **Exposure Factors Handbook, Volumes I, II e III.** National Center for Environmental Assessment (EPA/600/R-09/052F). Última atualização em setembro de 2011 (https://www.epa.gov/expobox/about-exposure-factors-handbook).

[46] US.EPA - Environmental Protection Agency (2014a). **Framework for Human Health Risk Assessment to Inform Decision Making.**

[47] VIANA, A. S.; ANJOS, J. A. S. A. **Mamona – Recuperação de solo contaminado e aproveitamento da sua biomassa**. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS. Campina grande: Embrapa Algodão, 2012.

[48] WAGNER, C. et al. **Potencial fitorremediador de Ricinus communis L. em solo contaminado por ferro, nas minas do Camaquã - RS**. 2022.

[49] ZABEO, A.; PIZZOL, L.; AGOSTINI, P.; CRITTO, A.; GIOVE, S.; MARCOMINI, A. **Regional risk assessment for contaminated sites Part 1: Vulnerability assessment by multicriteria decision analysis**. Volume 37. Novembro de 2011.

[50] ZHOU, Y. et al. Occurrence, source and ecotoxicological risk assessment of pesticides in surface water of Wujin District (northwest of Taihu Lake), China. **Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)**, v. 265, n. Pt A, p. 114953, out. 2020.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson